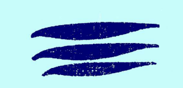
ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

L. PASTOURIAUX
M. BELLIER
A. VAROQUAUX
A. GALICHON

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

MACHINES ÉLECTRIQUES



LIBRAIRIE DELAGRAVE

105e Mille

ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

MACHINES ÉLECTRIQUES

à l'usage des Lycées techniques,
des Sections d'Électricité des Collèges techniques
et des Écoles d'Électricité industrielle

par

L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX

Inspecteur général honoraire de l'Enseignement technique

Directeur de l'École nationale professionnelle de Nancy

M. BELLIER et A. GALICHON

Agrégé des Sciences physiques
Professeur d'électricité au Conservatoire National des Arts et Métiers

Professeur à l'École nationale d'Ingénieurs Arts-et-Métiers de Paris



PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE
1965

Programmes des Écoles Nationales Professionnelles

CLASSE DE T I

Machines électriques.

Le circuit magnétique. — Lois du circuit magnétique. Électro-aimants et bobines à noyau de fer.

Alternateurs[1]. — Principe, organisation de l'alternateur monophasé et de l'alternateur triphasé. Fonctionnement. Réversibilité, existence du moteur synchrone.
Couplage des alternateurs.

Transformateurs statiques. — Principe, organisation du transformateur monophasé. Fonctionnement, rendement. Couplage.
Auto-transformateur. Transformateurs triphasés. Notions sur les transformateurs de mesure.

Réseaux de distribution. — Notions essentielles sur les réseaux de distribution en parallèle; centrales hydrauliques; lignes; postes de transformation et leur appareillage. Utilité de l'interconnexion.

Machines à courant continu. — Organisation de la machine à courant continu. Inducteur. Principes des enroulements bipolaires et multipolaires. Notions élémentaires sur la réaction d'induit et la commutation.

Génératrice â courant continu. — Force électromotrice. Fonctionnement; caractéristiques de la dynamo à excitation indépendante et des dynamos autoexitées.

Moteurs à courant continu. — Réversibilité de la génératrice; Force contre-électromotrice. Définitions des caractéristiques mécaniques et électriques.
Couple. Démarrage. Réglage de la vitesse, freinage.
Cas des moteurs à excitation indépendante, dérivée, série, composée. Usages.

Rendement des machines à courant continu. — Définition; principe de la mesure du rendement par la méthode des pertes séparées. Dynamo-frein.

Champ tournant. — Définition du champ d'induction tournant. Principe de sa production par des courants polyphasés; existence du moteur asynchrone et du moteur synchrone.

Moteur synchrone. — Retour sur la réversibilité de l'alternateur. Étude élémentaire du fonctionnement. Démarrage.
Fonctionnement en compensateur synchrone.
Existence de la commutatrice.

Moteur asynchrone (dit aussi **moteur d'induction**).
Organisation des divers types de moteurs triphasés.
Vitesse de synchronisme et glissement.
Étude élémentaire du fonctionnement : couple, démarrage, vitesse.
Existence des montages en cascade.
Moteur asynchrone monophasé; procédés de démarrage.

Moteurs à collecteur.
Fonctionnement du moteur série en courant alernatif; compensation.
Principe du moteur à répulsion; existence des moteurs à collecteur triphasés.

---

[1] L'ordre n'est pas impératif; on pourra traiter d'abord le transformateur.

AVERTISSEMENT

Cet ouvrage est l'adaptation aux nouveaux programmes des Écoles Nationales Professionnelles des manuels d'Electricité Industrielle de Messieurs Pastouriaux et Varoquaux. Il se caractérise par l'emploi systématique de la méthode expérimentale dans l'enseignement technique moyen.

Deux mots suffisent à définir cette méthode : ***expérimenter, raisonner.*** L'ordre de ces deux activités peut changer suivant les questions. Mais les deux sont indispensables parce qu'elles s'aident et surtout se contrôlent. Si l'on part d'expériences, il faut ensuite raisonner. Si l'on commence par le raisonnement, il faut que l'expérimentation suive. Nos lecteurs voudront bien reconnaître que cette discipline a été constamment appliquée dans notre livre[1].

Le souci de ne pas trop modifier l'ordre d'un ouvrage que de nombreux professeurs appréciaient et utilisaient, nous a amené à traiter les machines à courant continu avant celles à courant alternatif. Nous espérons que nos lecteurs estimeront que ce fait n'a en rien diminué la valeur pratique de ces leçons. De toutes façons, les professeurs, qui le jugeront utile, pourront, sans inconvénient, suivre l'ordre du programme officiel.

Les notions d'électronique, qui complètent le programme de la classe de T. I., font l'objet d'un autre volume.

---

1. Les expériences qu'il nous paraît indispensable de faire pendant le cours, sous les yeux et avec la participation des élèves, sont indiquées par un filet noir en marge du texte.

I. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE ET ÉLECTRO-AIMANTS

Ire LEÇON

Électro-aimants.

1. Les électro-aimants sont des aimants temporaires.

Les électro-aimants sont les machines électriques les plus simples. Ils se composent essentiellement d'un *noyau magnétique doux* (acier coulé ou tôles d'acier doux) entouré d'une ou plusieurs *bobines magnétisantes* dans lesquelles passe un courant électrique.

Deux propriétés expliquent leurs applications :

1° l'*aimantation* d'un électro-aimant est *temporaire*; sous réserve de

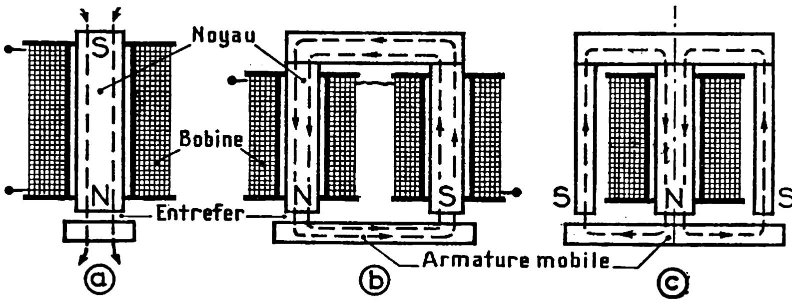


Fig. 1. — Voici quelques formes d'électro-aimants :
a) noyau droit;
b) noyau en U;
c) électro-aimant cuirassé.
Chaque électro-aimant est muni d'une armature mobile.

l'aimantation rémanente, elle apparaît et disparaît en même temps que le *courant magnétisant;*

2° les *actions magnétiques* produites sont en général plus *importantes* que celles obtenues avec un aimant permanent; *il est possible de les faire varier* en agissant sur l'intensité du courant.

2. On donne aux électro-aimants diverses formes suivant leur usage.

On donne au noyau des formes diverses adaptées à l'emploi de l'électro-aimant; voici, par exemple, trois types parmi les plus courants.

1° ***Electro-aimants à noyau fixe.***

La figure 1 représente une coupe schématique de trois modèles.

Le noyau attire une *armature mobile.* Cette armature peut soutenir un fardeau (électro-aimant *porteur*) ou déplacer une pièce mobile (électro-aimant *attractif*).

L'intervalle d'air compris entre l'armature et le noyau est appelé *entrefer.* Remarquons que les lignes d'induction tendant à se raccourcir, l'entrefer tend à diminuer de volume.

2° ***Electro-aimants à noyau plongeur.***

Plaçons une tige de fer doux dans l'axe et à l'extérieur d'une bobine. Faisons passer un courant dans la bobine : *la tige est avalée* jusqu'à ce que son milieu arrive au milieu de la bobine (fig. 2).

La course du noyau peut ainsi atteindre plusieurs centimètres, c'est le principe des électro-aimants à noyau plongeur (fig. 3). On les emploie pour obtenir un grand déplacement d'une pièce mobile. Les minuteries, utilisées pour la commande de l'éclairage des cages d'escaliers, sont actionnées par un électro-aimant de ce type. On en construit de grande puissance pour manœuvrer à distance les signaux de chemin de fer.

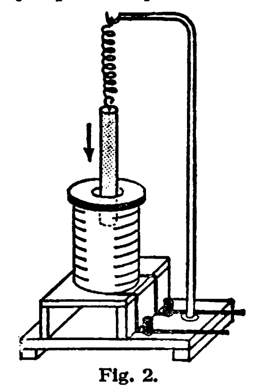


Fig. 2.

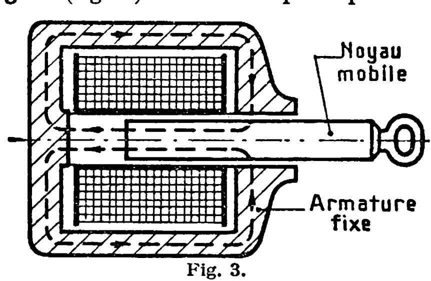


Fig. 3.

Fig. 2. — Lorsqu'un courant passe dans la bobine, la tige d'acier doux semble aspirée.
Fig. 3. — *Electro-aimant cuirassé à noyau plongeur.* La course du noyau peut être importante.

3° ***Electro-aimants produisant un champ magnétique intense.***

Les machines électriques *génératrices* transforment, en utilisant les *phénomènes d'induction*, de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Inversement, les *moteurs électriques* transforment l'énergie électrique en énergie mécanique; ils tournent sous l'action des *forces électromagnétiques* appliquées aux conducteurs de leurs rotors.

La production d'une f. é. m. induite, ainsi que la production de forces électromagnétiques, nécessite la création d'un champ magnétique. Les machines électriques, dynamos ou alternateurs, comprennent donc des électro-aimants destinés à produire un champ magnétique assez intense. Nous étudierons ces électro-aimants en étudiant ces machines.

La recherche scientifique nécessite parfois des électro-aimants géants C'est ainsi que la plupart des grands accélérateurs utilisés dans les recherches de physique nucléaire comportent comme organe principal un électro-aimant de grandes dimensions.

Le **cyclotron** installé au *Centre d'Études Nucléaires de Saclay* a une armature de 280 *tonnes* et il consomme une puissance de 96 *kilowatts* dans ses bobines magnétisantes pour fournir une induction d'environ 2 *teslas* ou *webers par mètre carré* entre deux pôles de 1,64 *mètre* de diamètre placés à 0,30 *mètre* l'un de l'autre. Mais ses dimensions restent modestes par rapport à celle de l'électro-aimant du *synchroton à protons* « Saturne » dont le rayon est 8,4 *mètres*, la masse 1 000 *tonnes* et qui consomme 1 000 *kilowatts*.

3. Étudions expérimentalement l'attraction qu'exerce un électro-aimant sur son armature.

Expérience. — Voici un petit électro-aimant cuirassé, dont le noyau central a 25 *mm* de diamètre et dont le diamètre extérieur du pôle externe est 85 *mm*. Sa bobine magnétisante comporte environ 700 spires. L'armature soigneusement dressée, s'applique sans jeu sur la surface des deux pôles.

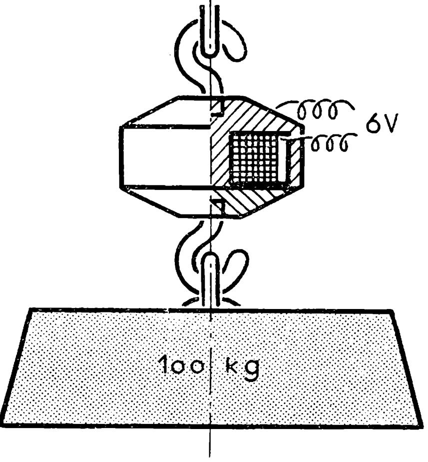


Fig. 4. — Un petit ***électro-aimant cuirassé*** a une force portante d'environ 100 *kgf* lorsque. l'armature est soigneusement appliquée contre les pôles.

Quand un courant de 3 A passe dans la bobine, l'armature appliquée sur les pôles y est maintenue par une force très importante, de l'ordre de 100 *kilogrammes-force* (fig. 4).

Plaçons entre l'armature et les pôles une tôle d'aluminium de 1 *mm* d'épaisseur, nous pouvons alors arracher assez facilement l'armature des pôles.

Remplaçons la tôle par une plaquette de 10 *mm*, l'attraction entre pôles et armature est très réduite (fig. 5).

L'attraction d'un électro-aimant sur son armature ***peut être très importante*** lorsque l'armature est au contact des pôles, *cette attraction diminue très vite lorsque la distance entre armature et pôles croît.*

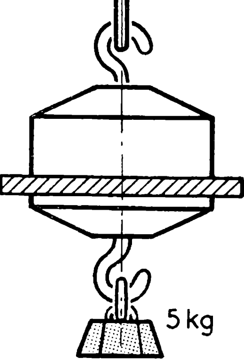


Fig. 5. — Quand la distance entre les pôles et l'armature croît, l'attraction diminue beaucoup.

4. Force portante d'un électro-aimant.

La force F exercée par les noyaux sur l'armature est appelée *force portante* de l'électro-aimant. On démontre que cette force est donnée en *newtons* par la relation :

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B^2 S$$

dans laquelle B est l'induction magnétique, en *teslas* ou *webers par* m^2, dans l'entrefer situé entre les noyaux et l'armature et S est, en *mètres carrés*, la surface totale des deux pôles.

Il est souvent plus simple d'utiliser la formule pratique équivalente :

$$\underset{kgf}{F} \simeq 4\underset{\substack{teslas \\ \text{ou } Wb/m^2}}{B^2} \ \underset{cm^2}{S}$$

Exemple. — Calculer la force portante d'un électro-aimant dont la surface d'un pôle est 1 cm^2 lorsque l'induction magnétique est 1,5 T ou Wb/m^2.

$$F = 4 \times 1{,}5^2 \times 2 = 18 \ kgf.$$

Les deux pôles ont en effet une surface totale de 2 cm^2.

Résumé.

1. Les électro-aimants sont des aimants dont on peut modifier l'aimantation. Ils se composent d'un noyau magnétique doux aimanté par une ou plusieurs bobines magnétisantes.

2. On donne aux électro-aimants des formes adaptées à leur usage : noyau fixe et armature mobile, noyau plongeur.

Les électro-aimants sont souvent utilisés pour obtenir des champs magnétiques intenses et réglables.

3. La force portante d'un électro-aimant est donnée par la relation :

$$F = 4 \; B^2 \; S$$

kgf *teslas* ou *Wb/m²* *cm²*

Exercices.

1. Chacun des pôles d'un électro-aimant a une surface de 16 *cm²* en contact avec l'armature. La force portante est 104 *kgf*, calculer l'induction dans l'entrefer.

On réduit la section des pôles de l'électro-aimant précédent à 10 *cm²* en conservant le même flux magnétique à travers la surface d'un pôle. Que devient la force portante?

2. Dessinez un électro-aimant en U, avec deux bobines, une sur chaque branche du noyau. Ces bobines sont en série. Indiquez par une flèche sur chacune de ces bobines quel doit être le sens du courant pour obtenir un pôle nord sur la branche de gauche et un pôle sud sur celle de droite (fig. 1*b*).

On inverse le courant dans les deux bobines, la force portante est-elle modifiée?

3. Quand on coupe le courant dans une bobine d'électro-aimant, il arrive que l'armature reste collée sur le noyau.

Pouvez-vous expliquer ce phénomène?

Comment peut-on l'éviter?

Flux d'induction et ampères-tours.

Rappelons quelques résultats de l'étude de l'électromagnétisme que nous avons faite dans le 1er volume de cet ouvrage[1].

1. Le tube d'induction et le flux qui le traverse.

La grandeur du champ magnétique en un point est caractérisée par le ***vecteur induction*** $\vec{B}$ (Wb/m^2).

Une ligne tangente en chacun de ses points au vecteur induction est une *ligne d'induction*; l'ensemble des lignes d'induction qui s'appuient sur un contour fermé est un *tube d'induction.*

Un tube d'induction est toujours un tube fermé sur lui-même (fig. 1).

Pour toutes les sections normales d'un même tube d'induction, le produit de l'induction B par l'aire S de la section à la même valeur Φ, qui est appelé ***flux d'induction*** *qui parcourt le tube* (fig. 2).

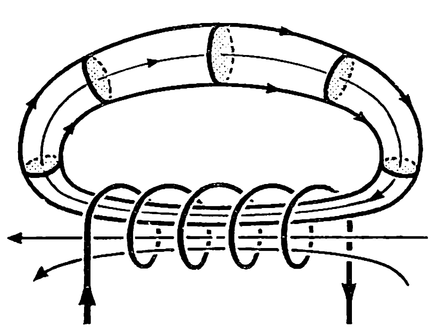
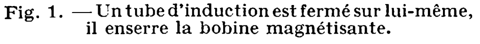



Fig. 1. — Un tube d'induction est fermé sur lui-même, il enserre la bobine magnétisante.

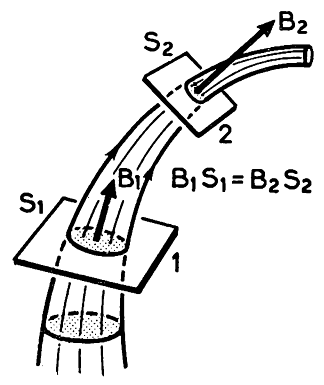


Fig. 2. — Le flux d'induction a même valeur à travers toutes les sections d'un même tube d'induction.

$$\underset{Weber}{\Phi} = \underset{Wb/m^2}{B} \times \underset{m^2}{S}$$

L'induction magnétique peut être considérée comme une densité de flux $B = \Phi : S$; d'où le nom usuel de l'unité : weber par mètre-carré.

1. *Électricité Industrielle. Lois générales :* 32e leçon et suivantes.

2. Les sources de champ magnétique sont les courants électriques.

La plus simple des sources est une bobine cylindrique régulièrement bobinée. Lorsque la longueur est grande devant les dimensions transversales, *l'induction produite à l'intérieur* (fig. 3) ne dépend plus des dimensions de la bobine, elle est déterminée uniquement par le nombre n_1 de spires par unité de longueur et par l'intensité i du courant; plus précisément par le produit $a = n_1 i$ *que l'on appelle* ***ampères-tours par mètre*** (At/m) ***magnétisants***.

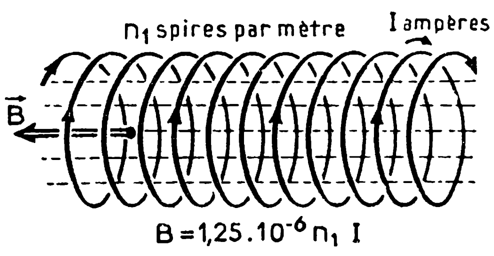


Fig. 3. — A l'intérieur d'une bobine cylindrique très longue l'induction dépend du nombre d'ampères-tours par mètre de la bobine.

Deux cas sont à considérer selon le matériau qui emplit l'intérieur de la bobine.

a) Ce matériau *n'est pas magnétique* : air, vide, bois, coton bakelite, etc.

L'induction B est alors proportionnelle aux At/m de la bobine et, pour tous les matériaux *non* magnétiques, ***il faut 800 000 At/m pour obtenir une induction de 1 Wb/m²***. D'où d'une façon générale (1)

$$\underset{At/m}{a} = 800\,000 \underset{Wb/m^2}{B}$$

b) Ce matériau est *magnétique :* fer, nickel, cobalt et certains de leurs alliages.

A l'intérieur de ces matériaux, il existe des courants *particulaires* qui s'orientent en files dans le champ magnétique et dont l'action magnétique s'ajoute à celle de la bobine magnétisante.

De ce fait, pour une même valeur a des At/m de celle-ci, on obtient une induction considérablement *plus grande* que pour un matériau *non* magnétique; usuellement plusieurs centaines de fois plus grande. C'est ce rapport de multiplication qui est appelé la *perméabilité* du matériau magnétique et qui est ordinairement noté μ.

D'où :

$$\underset{At/m}{a} = \frac{800\,000}{\mu} \underset{Wb/m^2}{B}$$

Mais cette formule n'est pratiquement pas utilisable, car, pour ces matériaux, l'induction n'est pas proportionnelle aux At/m magnétisants.

1. Le cœfficient 800 000 n'est qu'approché; exactement pour le vide ce cœfficient vaut $10^7 : 4\pi$.

Si bien que, pour un même matériau, *la perméabilité varie beaucoup* en fonction de l'induction : *ce n'est pas une constante* caractéristique du matériau.

Pratiquement la correspondance entre les At/m et l'induction B est connue par un tableau de nombres ou par une courbe, dite ***courbe***

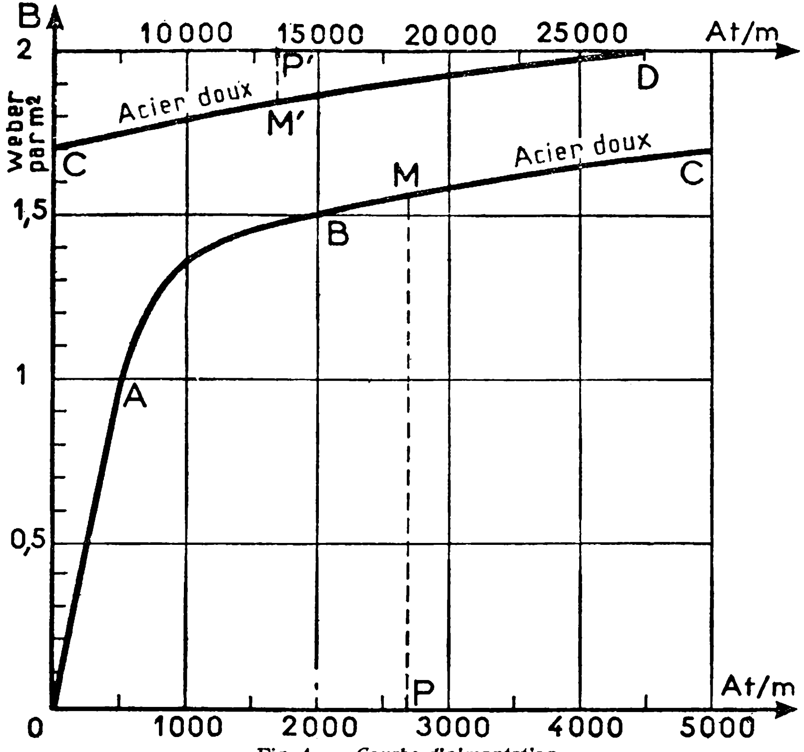


Fig. 4. — *Courbe d'aimantation.*

Courbe OABC : les At/m se lisent sur l'échelle du bas;
Courbe CD : les At/m se lisent sur l'échelle du haut.

d'aimantation, dont les ordonnées sont les inductions (Wb/m^2) et les abscisses les At/m (fig. 4).

Chaque matériau magnétique est caractérisé par sa courbe d'aimantation.

3. Le flux qui parcourt un tube d'induction donné ne dépend que du nombre d'ampères-tours qui enlacent le tube.

Cette règle, due à *Ampère*, permet d'établir la relation entre le flux dans un tube et les ampères-tours des bobines sources du champ.

Soit, par exemple, le champ produit par une bobine D (fig. 5).

Nous supposons connu le tracé des lignes d'induction : nous avons fait avec soin le spectre dans l'air et prolongé d'une façon vraisemblable les lignes d'induction dans le fer.

Considérons le tube d'induction qui s'appuie sur un petit contour C; soit Φ le flux qui le parcourt, en un point du tube où la section normale est S, l'induction est $B = \Phi : S$.

Sur le dessin, découpons le tube en *segments* LM, MN, suffisamment courts pour que nous puissions considérer la section de chacun d'eux comme constante : S_1 pour LM, S_2 pour MN etc....

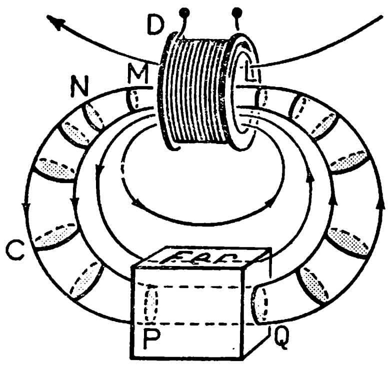


Fig. 5. — La bobine D parcourue par un courant engendre un champ magnétique dans lequel nous avons isolé le tube d'induction s'appuyant sur le contour C.

L'induction tout le long du segment LM a pour valeur $B_1 = \Phi : S_1$;
— — MN — $B_2 = \Phi : S_2$;

Supposons maintenant que pour produire ce *même flux* Φ dans ce *même tube*, nous utilisions au lieu de la bobine D, des *enroulements répartis* tout autour de *chacun des segments* du tube (fig. 6). Il faudrait alors recouvrir un segment tel que LM, *matériau non magnétique* où l'induction est B_1, par un enroulement dont le nombre d'*At/m*, serait $a_1 = 800\ 000\ B_1$. Cet enroulement hypothétique de longueur l_1 *mètres* comporterait donc un nombre d'ampères-tours : $A_1 = a_1 \times l_1$.

De même pour tous les segments du tube situés dans les matériaux non magnétiques.

Fig. 6. — On peut obtenir le *même flux* dans le *même tube* d'induction à l'aide d'enroulements répartis tout le long du tube. Nous n'en avons représenté que quelques-uns.

Pour les segments, tel PQ, qui sont *dans le fer*, le nombre d'At/m est donné par la *courbe d'aimantation*. Nous relevons sur celle-ci le nombre a_n d'At/m qui correspond à l'induction $B_n = \Phi : S_n$ qui règne dans ce seg-

ment du tube et nous achevons le calcul de A_n, ampères-tours de la bobine hypothétique, en multipliant a_n par la longueur l_n, en *mètres*, du segment :

$$A_n = a_n \times l_n.$$

La somme $A_1 + A_2 + .. + A_n + ...$ est le nombre d'ampères-tours des enroulements qui, *répartis tout le long du tube, y créeraient le flux* Φ

En réalité, le flux est produit par la bobine D. Mais, d'après la règle d'Ampère, le nombre d'ampères-tours NI (N nombre de spires, I courant qui les parcourt) de la bobine D est aussi égal à la somme

$$A_1 + A_2 + ... + A_n ...$$
$$NI = \Sigma A.$$

Le calcul s'inscrit commodément dans le tableau ci-dessous :

SEGMENT DU TUBE	SECTION S m^2	INDUCTION $B = \Phi : S$ Wb/m^2	AT/M a	LONGUEUR l m	AT $A = a \times l$
LM	...	...	...	...	...
MN	...	...	...	...	...
	$\Phi =$	⟶			$NI = \Sigma A$

4. Un énoncé qui fait image.

Les ampères-tours relatifs à un segment du tube sont parfois appelés les At consommés le long de ce segment. On peut alors énoncer :

Les ampères-tours consommés tout le long d'un tube d'induction sont égaux aux ampères-tours des bobines qui l'enlacent.

Résumé.

1. Un tube d'induction est toujours un tube fermé enlacé par les bobines magnétisantes.

2. Pour calculer les ampères-tours des bobines produisant un flux Φ dans un tube d'induction donné on détermine pour chaque segment du tube :

— l'induction $B = \Phi : S$ Wb/m^2;

— les ampères-tours par mètre : dans l'air par la formule $a = 800\,000$ B, dans le fer par la courbe d'aimantation;

— les ampères-tours consommés, en multipliant les At/m par la longueur en mètre du segment considéré.

Puis on fait la somme des At consommés tout le long du tube. Cette somme est égale aux At des bobines magnétisantes.

Exercices.

1. Combien faut-il d'At/m pour obtenir une induction de 1 Wb/m^2 dans un matériau non magnétique?

On relève sur la courbe d'aimantation de l'acier doux (fig. 4) qu'une induction de 1 Wb/m^2 correspond à 500 *At/m*. Quelle est la perméabilité de l'acier doux pour cette induction?

Déterminer de la même façon la perméabilité de cet acier pour une induction de 1,5 Wb/m^2.

2. Un tube d'induction est parcouru par un flux de 1 microweber (1 μWb). Calculer les At consommés :

a) dans un segment, situé dans l'air, dont la section est 1 cm^2 et la longueur 10 *cm*;

b) dans un segment, situé dans un matériau magnétique dont la perméabilité est 2 000, dont la section est 0,5 cm^2 et la longueur 20 *cm;*

c) dans un segment, situé dans l'acier doux, dont la section est 2 mm^2 et la longueur 1 *cm*.

3. Un tube d'induction de section constante 5 cm^2 a une longueur totale de 50 *cm* : 49,5 *cm* dans l'acier doux, 0,5 *cm* dans l'air. Un flux de 0,6 *milliweber* est produit dans ce tube par un enroulement magnétisant comprenant 1 200 spires. Calculer l'intensité du courant dans l'enroulement.

Le circuit magnétique.

1. Un circuit magnétique est un anneau presque fermé de matériaux magnétiques enlacé par des enroulements magnétisants.

Le plus simple des circuits magnétiques est un tore de fer de section constante entouré d'une bobine régulièrement bobinée (fig. 1).

Pratiquons une mince coupure dans ce tore ; la coupure est appelée *entrefer :* le tore coupé est un exemple de circuit magnétique avec entrefer.

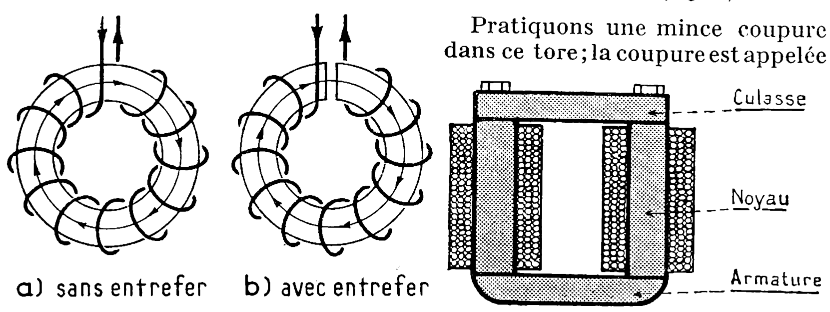


Fig. 1. — L'entrefer est la *petite* coupure pratiquée dans le tore en fer.

Fig. 2. — Un électro-aimant est essentiellement un circuit magnétique.

Tout appareil électro-magnétique comporte un circuit magnétique plus ou moins compliqué.

Fig. 3. — Circuit magnétique de l'électro-aimant d'un disjoncteur. En fonctionnement l'armature est en contact avec les pièces polaires.

2. Voici quelques circuits magnétiques d'appareils industriels.

a) La carcasse d'un électro-aimant tel que celui de la figure 2 est un circuit magnétique. Les tronçons en sont les deux noyaux, la culasse, l'armature.

L'enroulement magnétisant au lieu d'être uniformément réparti sur tout le circuit est massé en deux bobines, une par noyau.

b) Le circuit magnétique des petits disjoncteurs des rhéostats de démarrage des moteurs à courant continu comprend (fig. 3) : un noyau

cylindrique portant tout l'enroulement, deux pièces polaires à section rectangulaire, une armature mobile à section rectangulaire. Les joints au contact des pièces différentes constituent quatre espaces d'air de faible longueur : ce sont des *entrefers.*

c) Le circuit magnétique d'une dynamo bipolaire est plus compliqué. Le plan horizontal de symétrie divise la machine en deux circuits magnétiques accolés avec bobines magnétisantes communes.

La forme de l'entrefer est compliquée par l'existence d'encoches sur l'induit constitué par un empilage de tôles.

3. Pour calculer un circuit magnétique on l'assimile à un tube d'induction.

Calculer un circuit magnétique, c'est déterminer les *At* des bobines magnétisantes qui y produisent *un flux donné.*

Nous savons résoudre le problème pour un tube d'induction *dont nous connaissons le tracé* (leçon précédente).

Or dans les machines électriques les inductions restent modérées (1 à 1,5 Wb/m^2 usuellement), la perméabilité du fer reste grande, si bien que les lignes d'induction sont *canalisées par le fer vers les entrefers* qu'elles traversent par le plus court chemin.

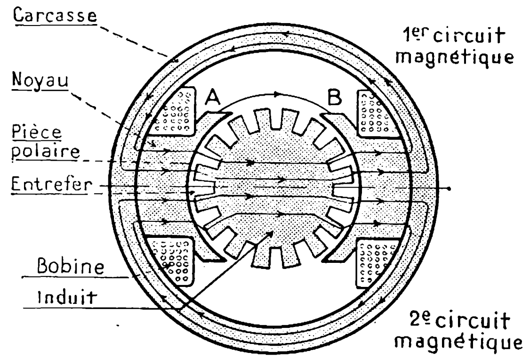


Fig. 4. — Schéma du circuit magnétique d'une dynamo bipolaire. La ligne d'induction AB qui ne pénètre pas dans l'induit est une ligne de fuites.

On peut donc assimiler *pratiquement* un circuit magnétique à un tube d'induction et lui appliquer le calcul de la leçon précédente.

4. Quelques exemples numériques :

a) *Un tore de 4 cm^2 de section et de 30 cm de longueur moyenne est recouvert d'un bobinage régulièrement réparti*[1]. *Calculer le nombre d'At produisant un flux de 0,0006 Wb?*

Le tore (fig. 1 *a*) est assimilé à un tube d'induction, l'induction qui

1. N'oublions pas que, dans l'application des formules, nos unités sont le *mètre* et le *mètre carré.*

y règne est $B = \Phi : S = 0{,}0006 : 0{,}0004 = 1{,}5$ *Wb/m²*; elle exige 2 000 *At/m* (relevé sur la courbe d'aimantation page 14). Soit au total : $2\,000 \times 0{,}3 = 600$ *At.*

L'assimilation du tore à un tube d'induction est ici pratiquement rigoureuse.

b) Pratiquons dans ce tore un entrefer de 1 *mm* (*fig.* 1 *b*). *Déterminons les At produisant le même flux que précédemment* 0,0006 *Wb.*

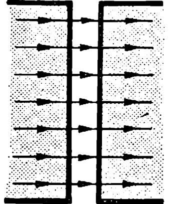


Fig. 5. — L'entrefer est très étroit; les lignes d'induction le traverse normalement à ses faces.

Les lignes d'induction sont canalisées dans le fer jusqu'à l'entrefer qu'elles traversent selon de petits segments de droites, perpendiculaires à la coupure, que vous pouvons confondre avec de petits arcs de cercle centrés sur l'axe. Elles ont, malgré la coupure, le même tracé que dans l'exemple précédent.

Le tube d'induction est encore le tore géométrique constituée par le fer et l'air de l'entrefer. Mais il se décompose maintenant en deux parties : l'une de 1 *mm* de long constituée par de l'air, l'autre de 30 *cm* (rigoureusement 29,9 *cm*) constitué par du fer. D'où le tableau :

PARTIES	SECTION m^2	INDUCTION Wb/m^2	AT/*m*	LONGUEUR *m*	AT
1 (fer)	0,0004	1,5	2 000	0,3	600
2 (air)	0,0004	1,5	1 200 000	0,001	1 200

$\Phi = 0{,}0006$ *Wb* ————→ NI = 1 800.

A la 1re ligne (fer) nous passons de l'induction aux *At/m* par la courbe d'aimantation.

A la 2e (air) nous appliquons la formule ***a*** *At/m* = 800 000 *B Wb/m²*.

Remarquons que le millimètre d'entrefer consomme deux fois plus d'*At* que les 30 *cm* de fer. On exprime souvent ce fait en disant que la *reluctance* de l'entrefer est deux fois plus grande que celle des 30 *cm* de fer.

c) Calcul d'un électro-aimant (voir en fin de leçon paragraphe 8).

5. Influence de la position des bobines.

Les calculs que nous venons de faire seraient rigoureux si les lignes d'induction étaient toutes bien exactement canalisées dans le circuit magnétique.

Nous pressentons qu'il en serait bien ainsi si *chaque partie* du circuit magnétique *portait exactement le nombre d'At qui y est consommé.*

Par exemple : a) *tore non coupé,* si l'enroulement était réparti sur tout le tore, à raison, par exemple, de 20 *spires* par *cm*, parcourus par un courant de 1 ampère;

b) *tore coupé,* si la partie fer était couverte de 20 *spires* par *cm* et si autour de l'entrefer, sur 1 *mm*, étaient tassées 1 200 *spires* (courant 1 *A*). Il est à peine besoin de faire remarquer que la place manquerait pour loger 1 200 *spires* sur une longueur de 1 *mm* avec une densité de courant acceptable (fig. 6).

En pratique l'enroulement a une répartition qui diffère plus ou moins de cette répartition théorique. Examinons comment le calcul des ampères-tours en est affecté.

Fig. 6. — Pour que les lignes d'induction restent bien rectilignes à la traversée de l'entrefer il faudrait disposer presque tous les At au droit de l'entrefer.

6. Les fuites magnétiques nécessitent ordinairement une augmentation des ampères-tours.

Supposons, par exemple, que nous répartissons d'une *façon régulière* l'enroulement *sur le fer du tore coupé* et que nous voulions obtenir *dans l'entrefer* un flux Φ_u, que nous appellerons ***flux utile.***

Au niveau de l'entrefer les lignes d'induction tendent à s'écarter (fig. 7) car il manque dans cette région les *At* qui seraient nécessaires pour les maintenir serrées. Certaines lignes d'induction sortent du fer avant l'entrefer et ne passent donc pas dans celui-ci. On dit qu'il y a *dispersion* ou encore que le circuit magnétique présente *des fuites.* Une partie du flux qui parcourt le fer évite l'entrefer : on l'appelle ***flux de fuites*** Φ_f.

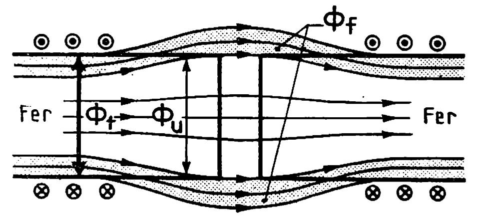


Fig. 7. — Les lignes de fuite ne passent pas dans l'entrefer; elles sortent du fer avant l'entrefer.

Le flux dans le fer est appelé ***flux total*** Φ_t. On a évidemment

$$\Phi_t = \Phi_u + \Phi_f.$$

L'induction *dans le fer* s'obtient en divisant le *flux total* par la section du fer; elle est donc *plus grande*, pour un même flux utile, que l'induction que nous avons calculée au paragraphe 4. Nous avons alors posé, à priori, les fuites négligeables, en admettant que toutes les lignes d'induction restaient canalisées par le fer jusqu'à l'entrefer.

Il s'en suit que pour un flux utile donné, les ampères-tours que nous avons calculé sont *trop faibles*.

Si on savait calculer le flux total en fonction du flux utile le calcul des ampères-tours pour un flux utile donné s'effectuerait sans difficulté. Malheureusement cette détermination est en général très difficile, sinon impossible. Pratiquement on se contente souvent d'appliquer un coefficient empirique dit *coefficient de fuites* ou d'Hopkinson.

C'est le rapport $k = \Phi_t : \Phi_u$ $(k > 1)$. ou $\Phi_t = k\,\Phi_u$ On trouve dans les formulaires la valeur de k pour les types les plus courants de circuits magnétiques.

Par exemple pour les dynamos bipolaires (fig. 4) $k = 1{,}15$ environ.

C'est dire que le flux total (carcasse, noyau polaire) est de 15 % supérieur au flux utile (entrefer, induit);

Remarquons que les fuites se produisent en toute rigueur *tout le long* du circuit magnétique : le flux total n'a plus de définition précise. Les notions Φ_u, Φ_f, Φ_t et le coefficient k sont des *notions technologiques* applicables seulement lorsque les fuites ne prennent de l'importance qu'au voisinage immédiat de l'entrefer.

En particulier l'emploi du coefficient de fuites devient très hasardeux dès qu'on s'écarte des types classiques de circuit magnétique. Les courbes d'aimantation elles-même ne sont connus qu'avec peu de précision. Pour ces raisons, il ne faut pas espérer une approximation meilleure que quelques unités pour cent dans les calculs de circuits magnétiques.

7. Choix de la position des bobines magnétisantes.

Il faut s'efforcer de réduire les fuites magnétiques. Ce qui s'obtient en massant les bobines le plus près possible du lieu où l'on veut obtenir le flux utile.

Par exemple pour obtenir un flux utile dans l'entrefer du circuit magnétique de la figure 8, la disposition 1 est supérieure à la disposition 2 : à égalité de flux utile, elle exige moins d'ampères-tours; à égalité d'ampères-tours, elle donne un plus grand flux utile.

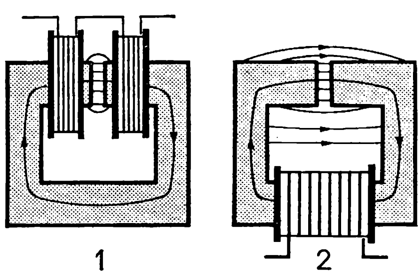


Fig. 8. — Avec la dipsosition 2 de la bobine magnétisante les fuites deviennent très importantes.

8. Calcul d'un électro-aimant.

Proposons-nous de *calculer les dimensions d'un électro-aimant dont la force portante sera* 300 *kilogrammes-force.*

a) Choix de l'induction : section des noyaux.

L'électro-aimant sera en acier coulé. Admettons dans les noyaux une induction de 1,5 *wéber par mètre carré.*

Pour un pôle, la force portante sera 150 *kgf.*

Avec la formule : $F = 4\,B^2S$ B en *teslas*, S en cm^2.

calculons S : $S = \dfrac{150}{4 \times 1{,}5^2} = 16{,}8\ cm^2$.

Les noyaux seront cylindriques et auront un diamètre de 46 *mm*;

b) Calcul des ampères-tours magnétisants.

Pour faciliter la fabrication de l'appareil, nous éviterons la forme en fer à cheval; une culasse sera rapportée.

Déterminons le circuit magnétique de l'électro projeté. Le diamètre des noyaux, seul, a été calculé. Fixons provisoirement les autres dimensions par comparaison avec des électros antérieurement fabriqués. La suite de l'étude montrera si ces dimensions sont acceptables. Si elles sont trop petites et ne permettent pas de loger les bobines, ou si elles sont trop grandes, nous les modifierons et recommencerons nos calculs.

En somme, nous procédons par tâtonnements en nous aidant de l'expérience acquise.

Sur le dessin, nous traçons la ligne d'induction moyenne du circuit magnétique et nous relevons les dimensions suivantes :

	Section	Longueur de la ligne d'induction
Noyaux :	$16{,}8\ cm^2$	$10 \times 2 = 20\ cm.$
Culasse :	$3 \times 6 = 18\ cm^2$	$7 + 3{,}14 \times 1{,}5 = 11{,}7\ cm.$
Armature :	$3 \times 4{,}6 = 13{,}8\ cm^2$	$11{,}7\ cm.$

4 joints sont traversés par le flux magnétique; les surfaces qui les constituent ne sont pas parfaitement dressées, nous estimerons que chaque joint correspond à un entrefer de 0,1 *mm*, soit au total 0,04 *cm.*

Nous admettons que les fuites sont nulles; le circuit magnétique est un tube d'induction. Calculons le flux qui le parcourt en considérant les noyaux :

$1{,}5 \times 16{,}8 \times 10^{-4} = 2{,}52.10^{-3}$ *wéber*. Donc, l'induction dans la culasse est :

$$2{,}52.10^{-3} : 18.10^{-4} = 1{,}4.\,Wb/m^2;$$

et dans l'armature :

$$2{,}52.10^{-3} : 13{,}8.10^{-4} = 1{,}82\ Wb/m^2.$$

Pour produire dans cet acier une induction de 1,4 Wb/m^2 il faut 1 700 *At/m*; 1,5 Wb/m^2, 2 600 *At/m*; 1,82 Wb/m^2, 11 200 *At/m*.

Nous obtenons donc le tableau suivant :

ÉLÉMENTS	B Wb/m^2	*At/m*	LONGUEUR EN *mètres*	*At*
Noyaux	1,5	2 600	0,2	520
Culasse	1,4	1 700	0,117	200
Armature	1,82	11 200	0,117	1 310
Entrefers	1,5	$1{,}2.10^6$	4.10^{-4}	480
			Total :	2 510

Il faudra environ 2 500 *At*, soit 1 250 par bobine.

c) Détermination des bobines.

La carcasse des bobines sera en laiton de 1 *mm* avec des joues de 2 *mm*.
Un carton isolant recouvrira la carcasse et les joues, sous l'enroulement.
Le bobinage aura donc une longueur de 94 *mm*.
En choisissant une intensité de 2 ampères, il faudra 625 spires par bobine.
Le fil de cuivre aura un diamètre de 8/10, soit 12/10 en tenant compte de l'iso-

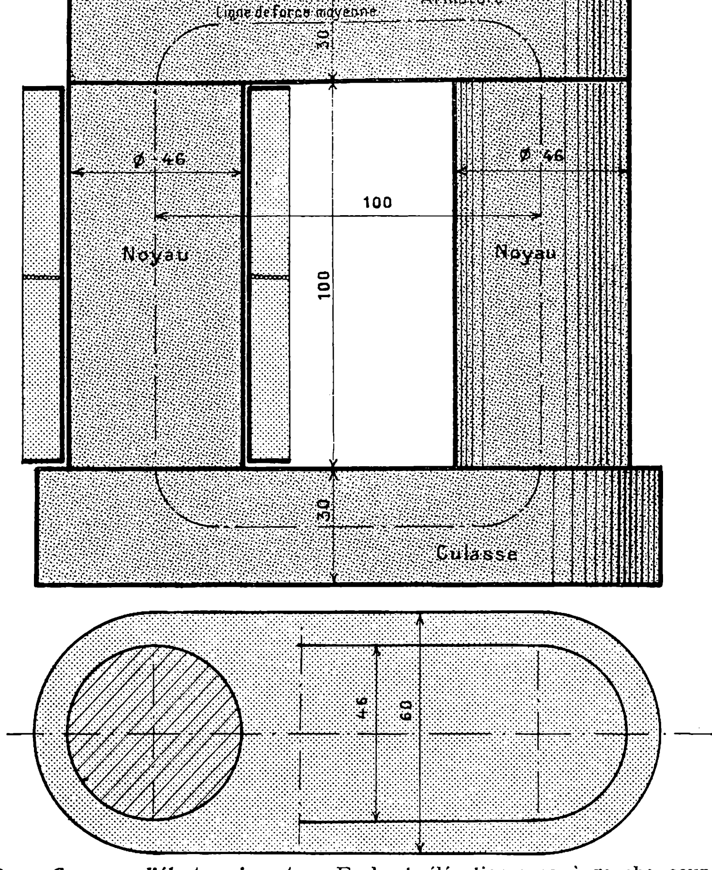


Fig. 9. — ***Carcasse d'électro-aimant.*** — En haut, élévation avec, à gauche, coupe d'un noyau et d'une bobine mise en place. — En bas, vue de dessus avec coupe d'un noyau. — Les cotes sont en millimètres.

lement avec deux couches de coton. Il y aura 94 : 1,2 = 78 spires par couche et 625 : 78 = 8 couches superposées.

Ces couches forment une épaisseur d'environ 1 *cm*. Une spire moyenne a donc un diamètre d'environ 56 *mm* et une longueur de 176 *mm*. Sur chaque bobine, il y aura

$$0{,}176 \times 625 = 110\ m \text{ de fil}$$

pesant 500 *g* et ayant une résistance de 3,84 Ω, soit pour les deux bobines 1 000 *g* de fil et une résistance de 7,68 Ω.

Pour obtenir 2 A dans les bobines 7,68 × 2 = 15,36 *volts* seront nécessaires.

L'enroulement sur chaque bobine ayant une épaisseur d'environ 1 *cm*, il restera plus de 3 *cm* entre les bobines placées sur les noyaux. On pourrait donc réduire notablement la longueur des noyaux et leur distance pour obtenir un électro plus ramassé.

d) Puissance mise en jeu : échauffement des bobines.

En *régime permanent*, lorsque le courant est établi et l'armature fixe, les phénomènes magnétiques, ne mettent en jeu aucune puissance. La puissance consommée par l'électro-aimant est dissipée en chaleur dans les bobines. Avec 2 *ampères* et 15,36 *volts*, les bobines reçoivent environ 31 *watts*.

La formule empirique suivante, donnée dans un formulaire, indique que pour une bobine immobile, qui se refroidit seulement par rayonnement, l'échauffement approximatif en degrés reste inférieur à

$$t^{\circ} = \frac{300\ p}{s}$$

p désignant, en *watts*, la puissance perdue en chaleur;
s, désignant, en cm^2, la surface extérieure de la bobine.

Dans le cas considéré, la surface extérieure des bobines est 415 cm^2, sans tenir compte des joues; on a :

$$t^{\circ} = \frac{300 \times 31}{415} = 22^{\circ} \text{ environ.}$$

Or, l'échauffement pourrait être de 40° sans inconvénient, ce qui montre à nouveau la possibilité de réduire les dimensions de l'électro.

Il conviendrait de recommencer l'étude en essayant 90 *mm* pour la longueur des noyaux et 80 *mm* pour la distance entre axes.

Résumé.

1. Un circuit magnétique est une chaîne presque fermée de matériaux magnétiques enlacée par les bobines magnétisantes.

2. Dans la pratique on assimile le circuit magnétique a un tube d'induction. Pour calculer les At des bobines magnétisantes produisant un flux Φ donné dans le circuit magnétique, pour *chaque partie* du circuit magnétique on détermine successivement :

l'induction $B = \Phi : S$ (S en m^2);

les At/m { dans l'air par la formule a = 800 000 B,
dans le fer par la courbe de magnétisme;

les At consommés en multipliant les At/m par la longueur en mètre.

Puis on fait la somme des At consommés dans toutes les parties du circuit magnétique.

3. Les fuites magnétiques augmentent les At nécessaires à l'obtention d'un flux utile donné. On les réduit en rapprochant au maximum les bobines des entrefers.

Exercices.

1. Un tore en acier doux de 1,20 *m* de longueur moyenne et de 10 cm^2 de section est recouvert d'un enroulement de 480 spires.

Calculer le courant pour que le flux dans le tore soit $1,5.10^{-3}$ *Wb?* pour que le flux à travers la bobine soit 0,85 *Wb?*

Réponses : 5 A; 25 A.

2. Mêmes questions que précédemment. Après avoir pratiqué dans le tore un entrefer de 1 *mm*.

Réponses : 7,5 A; 28 A.

3. Un tore en acier doux a 1 *m* de longueur moyenne; il comporte un entrefer de 2 *mm*. Il n'y a pas de fuites magnétiques. La bobine magnétisante comporte 600 spires.

a) Calculer les ampère-tours nécessaires pour produire dans l'entrefer une induction de 1 Wb/m^2? de 1,3 Wb/m^2? de 1,4 Wb/m^2 et de 1,5 Wb/m^2.

b) Tracer la courbe représentative de l'induction B dans l'entrefer en fonction du courant dans la bobine magnétisante et en déduire l'induction dans l'entrefer pour un courant de 4,7 A. Pouvez-vous répondre à cette dernière question directement sans connaître les résultats de *a*?

Réponses : *a*) 2 200; 2 900; 3 340; 5 000. *b*) 1,3 Wb/m^2 environ; non, car *nous savons déterminer les At à partir du flux ou de l'induction, mais nous ne savons pas faire l'inverse sans tâtonnement.*

4. Déterminer le nombre d'ampères-tours produisant dans l'armature du circuit magnétique de la figure 3 une induction de 1 Wb/m^2. L'appareil est en acier doux. On tiendra compte de deux entrefers de 0,1 *mm* entre l'armature et les pièces polaires. On prendra pour ce coefficient d'Hopkinson la valeur 1,25.

Nota. — Le flux utile est le flux dans l'armature et les entrefers. Le flux total est le flux dans le noyau cylindrique (entouré par la bobine). On supposera que le flux total passe aussi dans les pièces polaires.

Calculer la force d'attraction sur l'armature.

Réponses : 1 450 *At* dont 1 200 consommés dans le noyau; 26 *kgf* environ.

5. Recommencer le calcul du paragraphe 8 en prenant 80 *mm* entre les axes des noyaux et 90 *mm* comme longueur de noyaux.

6. Quand la distance entre l'armature et les extrémités des noyaux d'un électro-aimant dépasse quelques millimètres, les ampères-tours consommés par le fer deviennent négligeables par rapport à ceux consommés par les entrefers. Les At magnétisants servent à produire le flux dans les entrefers et le flux de fuites.

Pour un courant déterminé dans les bobines et en négligeant les fuites magnétiques, démontrer que la force portante d'un électro-aimant à grands entrefers est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'armature aux noyaux.

Quand cette distance augmente, la dispersion magnétique croît; quelle est l'influence de cette dispersion sur la force portante.

7. Le circuit magnétique d'un électro-aimant de contacteur est du type cuirassé (fig. 1 *c*, page 7). Il est en acier doux et ses dimensions sont les suivantes :

— noyau central : section 25 × 25 *mm*², longueur 35 *mm*;
— noyau latéral : section 12,5 × 25 *mm*², longueur 35 *mm*;
— culasse : section 12,5 × 25 *mm*², longueur 80 *mm*;
— armature : section 14 × 25 *mm*², longueur 80 *mm*.

Les entrefers entre la culasse et les noyaux sont négligeables. La bobine magnétisante comporte 2 000 spires.

1° Faire un croquis coté de cet électro-aimant et tracer les lignes d'induction moyennes des deux circuits magnétiques accolés.

2° Lorsque l'armature est collée contre les noyaux, les entrefers résiduels sont de 0,1 *mm*, calculer le courant qui doit circuler dans la bobine pour que la force d'attraction sur l'armature soit 25 *kgf*.

Applications des électro-aimants.

Les applications industrielles des électro-aimants sont très nombreuses. Nous ne pouvons en citer que quelques exemples.

1. Inducteurs des dynamos, moteurs et alternateurs.

Les inducteurs des dynamos et moteurs à courant continu sont de gros électro-aimants. Ils sont fixes. Les inducteurs des alternateurs

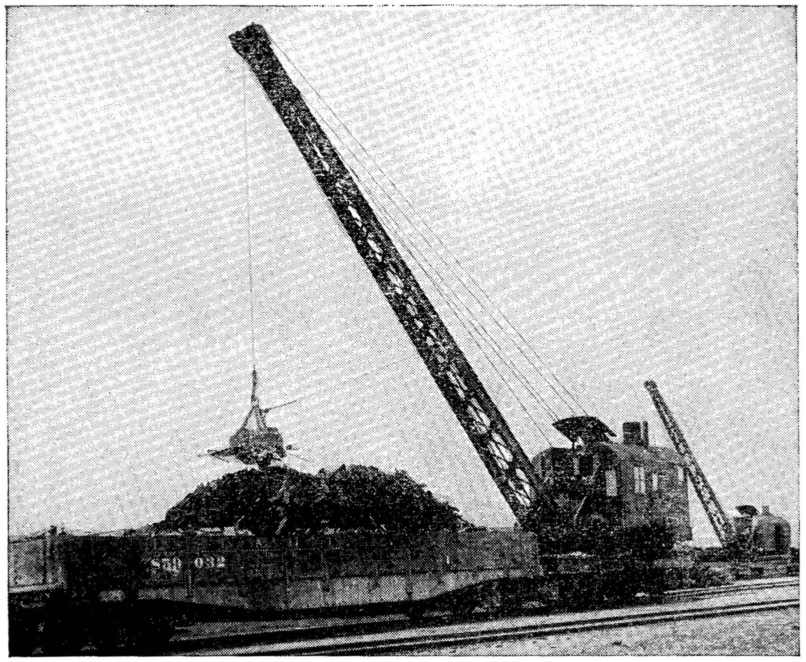


Fig. 1. — Électro de levage servant à décharger un wagon de ferraille.

sont tournants. Ce sont aussi des électros. Les uns et les autres servent à produire un flux qui atteint plusieurs millions de maxwells dans les entrefers des machines.

2. Électros de levage.

Pour manutentionner des matériaux magnétiques tels que plaques de blindage, rails, gueuses de fonte, paquets de ferrailles, il est avantageux d'adapter aux crochets des ponts roulants ou des grues de gros électros qui enlèvent les charges à transporter sans qu'il soit besoin de cordes ou de chaînes (fig. 1).

Ces électros de levage (fig. 2) sont des cloches d'acier avec, dans leur axe, un noyau entouré

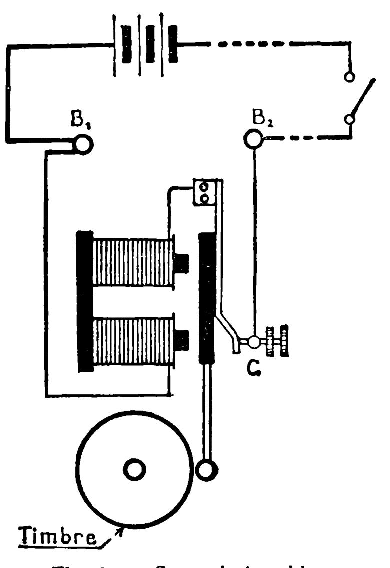


Fig. 3. — Sonnerie trembleuse

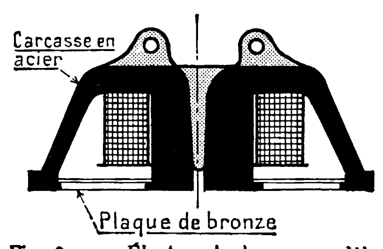


Fig. 2. — Électro de levage modèle circulaire.
Où sont les pôles de cet électro-aimant?

d'une bobine. Une plaque de métal non magnétique ferme la cloche et protège la bobine. On construit de ces électros qui ont une force portante de 50 000 kilogrammes.

3. Sonnerie à trembleur.

Cet appareil est si simple qu'il suffit du schéma de la figure 3 pour en comprendre le fonctionnement.

4. Annonciateur téléphonique.

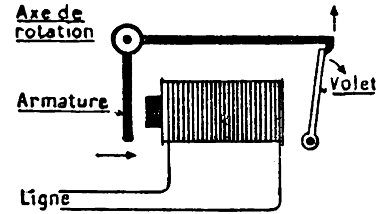


Fig. 4. — Annonciateur téléphonique.

Le passage du courant d'appel dans l'électro fait tomber un volet (fig. 4). Le téléphoniste est ainsi averti d'une demande de communication.

5. Relais.

Un électro, construit pour fonctionner avec un courant très faible.

ferme ou ouvre au loin un circuit local (fig. 5) dans lequel se trouve soit une sonnerie, soit un moteur.

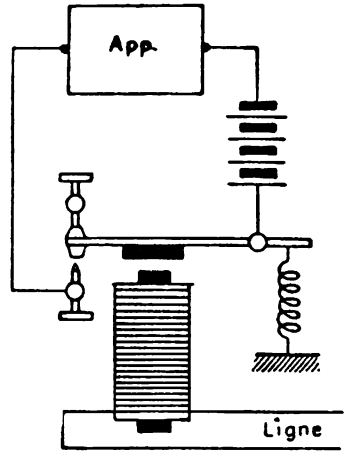


Fig. 5. — Relais — L'électro ferme un circuit contenant l'appareil à faire fonctionner et une source de courant.

6. Plateaux et mandrins magnétiques.

Pour maintenir des pièces de fer ou d'acier trop minces et fragiles pour pouvoir être bridées ou serrées sur le plateau d'une fraiseuse, d'une rectifieuse ou un mandrin de tour, on les plaque sur un plateau ou un mandrin magnétiques. Ces appareils sont constitués par des électros à noyaux droits (fig. 6) montés dans une carcasse en acier doux. Les pièces polaires sont séparées de la carcasse par des bagues en laiton emmanchées à la presse. Le circuit se ferme par les pièces à travailler posées sur l'appareil et qui sont ainsi fortement attirées par les pôles.

Les mandrins magnétiques, montés sur des machines à mouvement circulaire, sont munis d'une prise de courant par frotteurs Les pièces doivent être désaimantées après usinage.

7. Disjoncteurs à maxima d'intensité.

Ce sont des appareils qui coupent le courant quand l'intensité en devient trop grande.

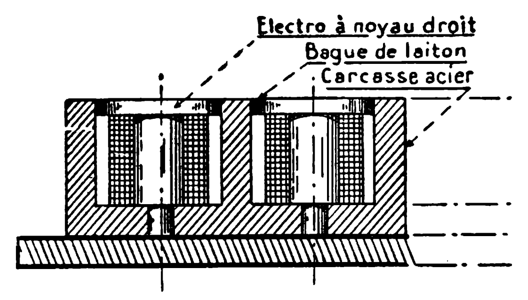


Fig. 6. — Coupe d'un plateau magnétique

Le modèle de tableau (fig. 7) comporte des balais B en lames de cuivre écroui faisant ressort qui s'appliquent sur les plots *P* pour fermer le circuit. Le contact est maintenu par un crochet C.

Un électro à avalement A est parcouru par la totalité ou une partie du courant. Quand l'intensité est grande, le noyau N de cet électro est avalé; la tige qui le prolonge frappe et soulève le crochet; le ressort R logé dans l'axe de rotation de la manette rappelle celle-ci en arrière et le circuit est coupé.

Un pare-étincelles, formé de deux plaques de charbon entre lesquelles se termine la coupure du circuit, empêche l'étincelle de rupture de détériorer les plots de contact et les balais.

On règle le disjoncteur pour qu'il déclenche à une intensité désirée en faisant pénétrer le noyau plus ou moins dans la bobine à l'aide d'une vis de réglage disposée sous son extrémité inférieure.

Charbon
Ligne
P
B
C
P
L
A
R
Ligne
N
Vis de réglage

Fig. 7. — Disjoncteur à maxima.

8. Disjoncteurs à minima de tension.

Ils coupent le circuit quand la tension à leurs bornes baisse de façon anormale.

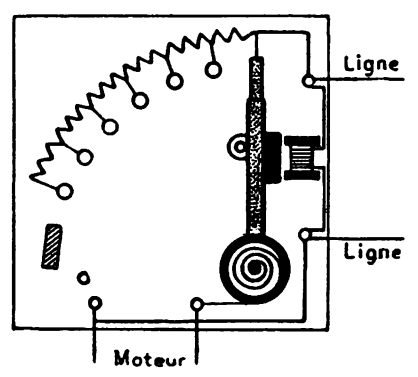


Fig. 8. — Disjoncteur à minima monté sur un rhéostat de démarrage pour moteur.

Dans les démarreurs de moteurs à courant continu, la manette du rhéostat est rappelée à sa position de départ, pour laquelle le circuit est coupé, par un ressort spiral logé dans l'axe de rotation de la manette (fig. 8).

La manette est maintenue en po-

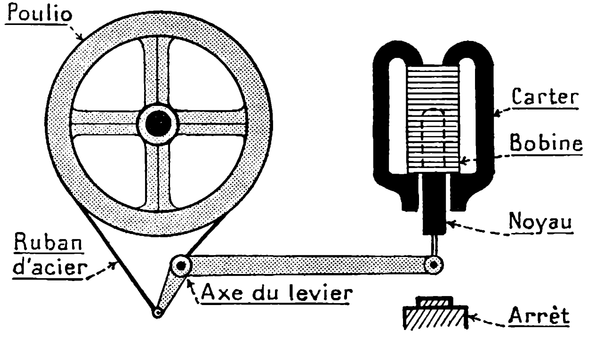


Fig. 9. — Frein à ruban — Expliquez le fonctionnement de ce frein.

sition de travail sur le dernier plot, où le rhéostat est en court-circuit, par un électro à bobine de fil fin en dérivation sur les bornes d'arrivée du courant. Quand la tension baisse beaucoup, la force portante de l'électro diminue tellement que le ressort de rappel détache l'armature et ramène la manette à sa position de départ.

9. Frein électromagnétique, à ruban.

Ce frein est employé surtout dans les ponts-roulants. Un électro à avalement serre un ruban d'acier sur une poulie calée sur un arbre; il ralentit ou bloque le mouvement de l'arbre (fig. 9) quand on lance le courant dans la bobine.

10. Contacteurs électromagnétiques.

Un contacteur est un ***interrupteur commandé à distance.***

Cet interrupteur principal est solidaire de l'armature d'un électro-aimant. Il se ferme lorsqu'un courant parcourt la bobine magnétisante de cet électro-aimant; il s'ouvre si ce courant disparaît.

Les circuits magnétiques des électro-aimants des contacteurs à courant continu sont en acier doux massif (fig. 10), ceux utilisés en courant alternatif ont un circuit magnétique feuilleté.

Le circuit de l'électro-aimant peut-être commandé par un interrupteur de faibles dimensions, mais, souvent, on préfére des boutons-poussoirs.

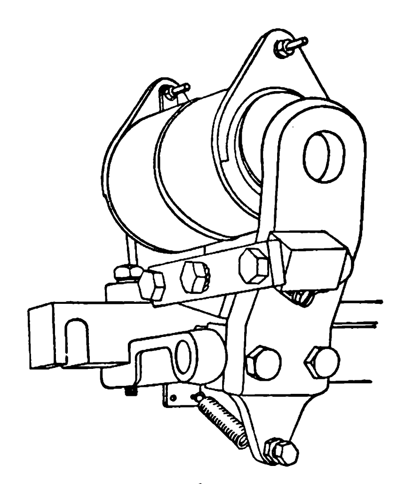


Fig. 10. — Électro-aimant pour *contacteur à courant continu.*

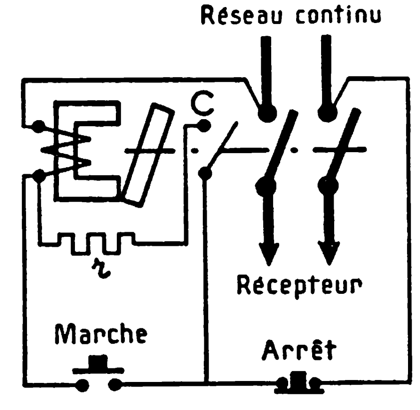


Fig. 11. — Schéma du *branchement d'un contacteur* à courant continu.
La ligne — - — indique que l'interrupteur principal est solidaire de l'armature de l'électro-aimant.
Appuyez sur le bouton Marche : l'interrupteur s'enclenche. Que se passe-t-il quand vous relâchez ce bouton?

Un bouton, ouvert dans sa position de repos, est marqué « *Marche* » (fig. 11). Appuyons sur ce bouton, le circuit de l'électro-aimant se ferme, l'interrupteur enclenche.

Pour que l'enclenchement persiste, quand on cesse d'appuyer sur le bouton « Marche », un ***contact auxiliaire de maintien*** C, solidaire de l'interrupteur principal, se ferme en même temps que lui. Ce contact, branché en parallèle avec le bouton « Marche », conserve alors le circuit de commande fermé.

Pour ouvrir, quand on le désire, l'interrupteur principal on appuie sur le bouton « *Arrêt* » qui coupe le circuit de l'électro-aimant.

Au début de l'enclenchement, l'entrefer du circuit magnétique est grand. A la fin, il est très réduit; un courant plus faible suffit pour maintenir l'armature. En courant continu, on diminue l'intensité du courant dans la bobine magnétisante en introduisant une résistance *r* (fig. 11) en série avec le contact de maintien C.

En alternatif cet artifice est inutile, l'inductance de la bobine augmentant lorsque le circuit magnétique se ferme.

Résumé.

Les électro-aimants sont utilisés :

a) **soit pour produire des forces petites, mais commandées à distance : signalisation, télégraphie contacteurs;**

b) **soit pour produire de grandes forces : électro-porteur, plateaux et mandrins magnétiques.**

Exercices.

1. **Imaginer et faire un schéma de principe d'un frein à ruban qui bloque un arbre en l'absence de courant et qui le débloque lorsque le courant passe dans la bobine**

2. **Imaginer et faire le schéma de principe d'un embrayage magnétique.**

3. **Ne pourrait-on pas en principe utiliser des électro-aimants pour remplacer dans une machine à vapeur la force de la vapeur. Imaginer et faire un schéma d'une machine jouet de ce genre? Comment serait fait l'organe qui, dans cette machine, jouerait le rôle que joue le distributeur de vapeur dans la machine à vapeur?**

4. L'électro-aimant de levage, dont la figure 2 de la page 25 est le schéma possède une force portante de 20 *tonnes* pour une induction de 1,6 Wb/m^2. Calculer le diamètre du pôle central et le diamètre intérieur de la couronne constituant l'autre pôle de l'appareil, dont le diamètre extérieur est 1 000 *mm*, dans le cas où les deux pôles ont la même surface portante.

2. — DYNAMOS A COURANT CONTINU

5e LEÇON

Description d'une dynamo bipolaire

Examinons une dynamo d'un type moderne (fig. 1). **Pour les parties** de la machine qui ne seraient visibles qu'en démontant l'appareil, **nous** nous servirons des dessins de fabrication.

Nous n'étudierons pas la construction mécanique de la dynamo, seule sa constitution magnétique ou électrique nous intéresse.

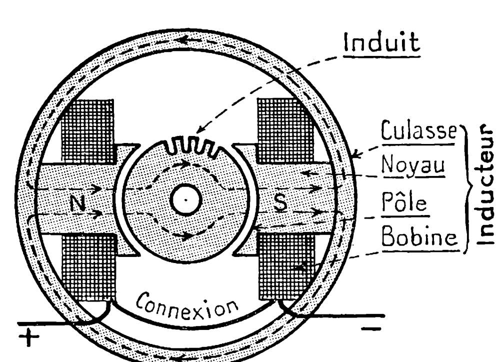


Fig. 2. — Schéma de l'inducteur et de la carcasse de l'induit. Quelques encoches seulement ont été représentées sur l'induit.

Il s'agit d'une dynamo bipolaire, 115 *volts*, 1 800 *watts*, 1 600 *tours par minute*.

Elle comprend une partie fixe : l'*inducteur*, une partie mobile : l'*induit* avec le *collecteur*.

1. Constitution de l'inducteur.

C'est un ***électro-aimant***, il comporte (fig. 2):

a) ***une culasse :*** c'est le bâti de la machine fait d'une couronne circulaire en acier coulé;

DYNAMO BIPOLAIRE

1800 W. 115 V. 1600 Tr/MN

Fig. 1 — A gauche, élévation-coupe longitudinale de la dynamo.
A droite, demi-vue extérieure et demi-coupe.
Voir page 35, les dimensions principales.

b) ***deux pôles*** (fig. 3), avec ***épanouissements polaires.*** Ces pôles sont constitués par des tôles empilées pour donner des noyaux rectangulaires. Ils sont boulonnés sur la culasse.

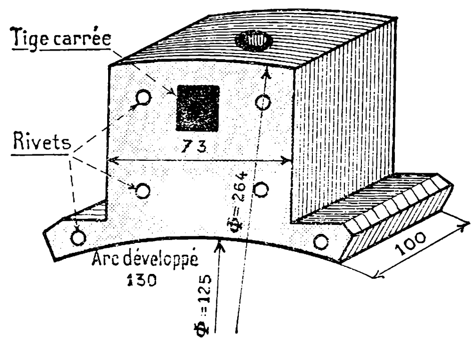


Fig. 3. — Schéma d'un pôle. La tige de fer carrée qui traverse le pôle sert d'écrou au boulon de fixation sur la carcasse.

Les épanouissements polaires alésés en cylindre creux occupent chacun environ un tiers de la surface de l'alésage.

c) Chaque pôle porte une ***bobine inductrice.*** Les deux bobines sont montées en série et disposées pour qu'un courant qui les traverse aimante les pôles en donnant un pôle N à l'un des épanouissements polaires, un pôle S à l'autre.

2. Description de l'induit.

a) Sur l'arbre de l'induit, un empilage de tôles circulaires forme un cylindre, ou ***tambour:*** c'est la *carcasse* de l'induit.

Ces tôles sont au silicium (qualité 2,6 watts par kilogramme), minces, isolées les unes des autres par du papier.

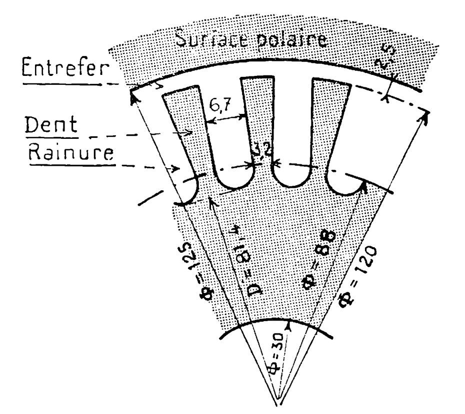


Fig. 4. — Portion d'une tôle d'induit et d'une surface polaire de l'inducteur. — Dans les machines de très petite puissance et de très petit diamètre, on évite l'étranglement à la base des dents en donnant aux encoches une base étroite.

Sur la périphérie, le tambour est creusé de *rainures* ou *encoches* profondes parallèles aux génératrices. Les parties en tôle qui restent entre les rainures se nomment les *dents;* elles sont étroites à leur base (fig. 4).

Le diamètre extérieur du tambour est un peu plus faible que celui de l'alésage des pièces polaires. Il y a ainsi, entre les pièces polaires de l'inducteur et la carcasse de l'induit, un *entrefer* dont la longueur est un peu plus grande sous les *becs* ou *cornes* polaires que dans la région médiane des pôles.

b) Dans les rainures est logé l'*enroulement* de l'induit.

Un conducteur AB, qui passe dans une rainure, se continue sur la base du tambour suivant BC, puis dans la rainure diamétralement opposée

suivant CD, et enfin suivant DE sur l'autre base, formant ainsi une *spire;* le conducteur continue à nouveau dans les rainures, plusieurs fois, formant ainsi plusieurs spires qui constituent une *section* de l'enroulement. Plusieurs sections sont réunies sous une même enveloppe de ruban de coton pour former une *bobine*. Une bobine possède autant de fils d'entrée et autant de fils de sortie qu'elle comporte de sections (fig. 6).

Un côté d'une bobine est placé dans le fond d'une encoche préalablement garnie d'un carton isolant, l'autre côté dans la moitié supérieure d'une autre encoche diamétralement opposée.

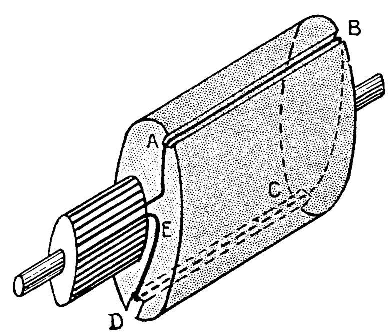


Fig. 5. — Disposition d'une section dans deux encoches de l'induit.

L'enroulement est maintenu dans les rainures par une bande de carton

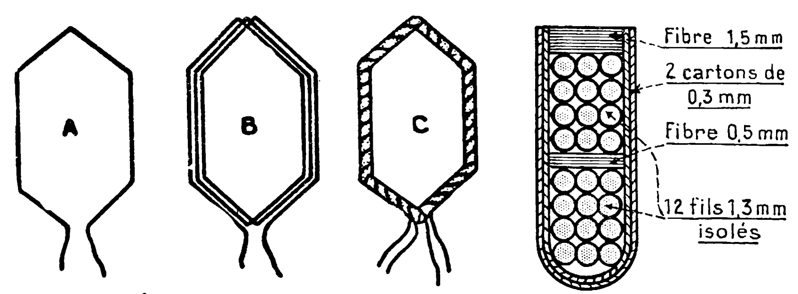


Fig. 6. — Éléments d'enroulement d'induit
A. — Spire.
B. — Section de trois spires.
C. — Bobine de deux sections.

Fig. 7. — Coupe d'une rainure de l'induit.

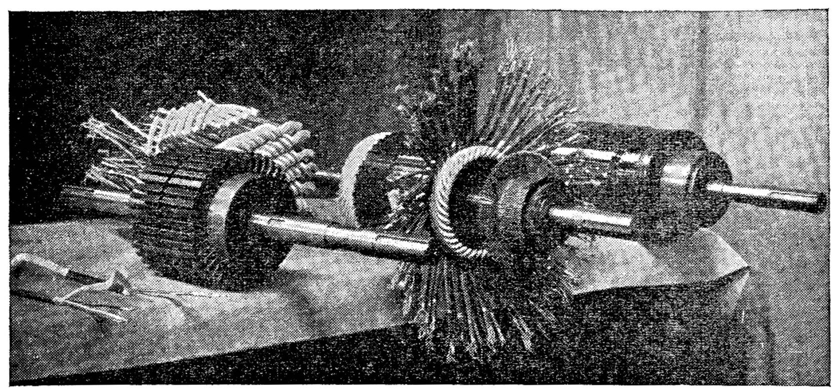
épais et solide. Des frettes en fil d'acier empêchent l'ensemble de se disloquer sous l'action de la force centrifuge (fig. 7).

Le fil de sortie d'une section et le fil d'entrée d'une autre section sont soudés à une même lame du collecteur. L'enroulement est donc fermé

3. Collecteur.

Le collecteur est claveté sur l'arbre de l'induit. Il se compose de *lames de cuivre*, isolées les unes des autres par du mica et isolées à la micanite de la douille sur laquelle elles sont montées (fig. 9).

Chaque lame porte une ailette à laquelle sont soudés la fin d'une



Cliché Alsthom.

Fig. 8 — ***Induits de dynamos*** en cours de fabrication.
De gauche à droite sont photographiés:
des bobines d'induit;
une carcasse d'induit;
un induit avec toutes ses bobines en place et son collecteur;
un induit complètement terminé.

section de l'enroulement de l'induit et le commencement de la section suivante.

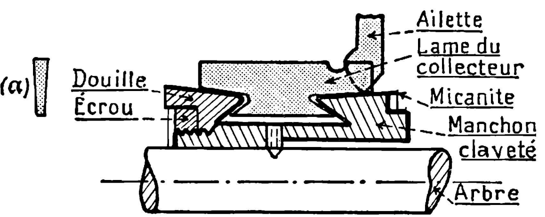


Fig. 9. — Demi-coupe du ***collecteur.***
A gauche, (a) section d'une *lame de cuivre* du collecteur.

4. Balais.

Des *balais* (fig. 10) en charbon graphitique, poussés par des ressorts, appuyent sur des lames diamétralement opposées du collecteur. Ces balais sont montés dans des cages fixées sur des tiges de laiton isolées électriquement de la couronne avec laquelle on les fixe sur la carcasse de la machine à peu près dans l'axe des pôles. Chaque ligne de balais en comporte deux.

5. Plaque de bornes.

Quatre bornes sont montées sur une plaque isolante (fig. 11) : deux grosses reliées aux balais : ce sont les *bornes de l'induit;* deux plus petites, connectées aux extrémités du circuit des deux bobines inductrices en série : ce sont les *bornes de l'inducteur.*

6. Schéma d'une dynamo.

On représente les dynamos par des symboles plus ou moins simpli-

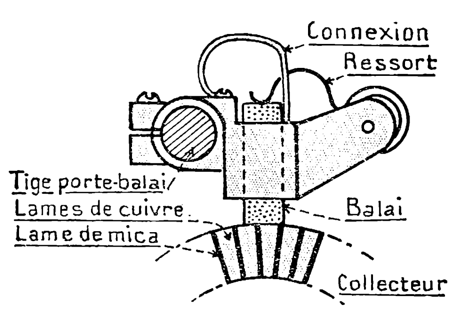


Fig. 10. — Un balai dans sa cage.

Fig. 11. — Les connexions sont à l'intérieur de la machine et faites par le constructeur.

Plaque isolante
Borne
Induit
Inducteur

fiés suivant l'utilisation des dessins où ils figurent (fig. 12).

Dans le schéma (*a*), sont représentés les pôles des inducteurs, l'induit et les balais.

La forme (*b*) est plus simple; la lettre G, soulignée d'un trait droit, signifie qu'il s'agit d'une génératrice à courant continu.

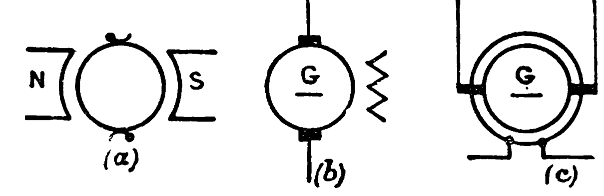


Fig. 12. — Symboles représentant une dynamo. Les symboles (*b*) et (*c*) sont normalisés.

Dans le schéma (*c*), l'induit et l'inducteur sont indiqués par des cercles concentriques, l'induit par le cercle intérieur sur lequel s'appuient les balais.

7. Dimensions principales de la dynamo étudiée.

Pour préciser la description qui précède, nous donnons ci-dessous les dimensions principales de la petite dynamo, 115 volts, 1 800 watts, 1 600 tours par minute, que nous avons choisie comme type (fig 1).

CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Culasse (bâti de la machine).
Diamètre intérieur : 264 *mm*.
Épaisseur moyenne : 19,5 *mm*.
Longueur : 160 *mm*.
Section : 31,2 cm^2.

Longueur moyenne d'une ligne d'induction : 44 *cm*.
(Les deux moitiés de la culasse sont en parallèle.)

Pôle.

Les pôles sont en tôle de 1 *mm*, non isolée. La section réelle du fer est égale au produit de la section apparente par le coefficient de réduction 0,95.

Largeur : 73 *mm*.
Longueur : 100 *mm*.
Section nette : $7{,}3 \times 10 \times 0{,}95 = 69{,}5\ cm^2$.
Longueur moyenne d'une ligne d'induction : 7,3 *cm*.

Entrefer.

Arc polaire développé : 130 *mm*.
Section nette : $13 \times 10 \times 0{,}95 = 123\ cm^2$.
Diamètre d'alésage : 125 *mm*.
Longueur d'une ligne d'induction dans un entrefer : 0,25 *cm*.

Tambour de l'induit.

Les tôles ont 0,5 *mm* d'épaisseur. Elles sont isolées au papier. Le coefficient de réduction de la section est 0,90

Carcasse. — *Zone des rainures*. 28 encoches, largeur : 6,7 *mm;* profondeur : 16 *mm*, le fond est demi-cylindrique.

Dent : largeur la plus grande : 6,8 *mm*.
largeur la plus faible : 3,2 *mm*.
Longueur du tambour : 105 *mm*.
Section des dents sous un pôle : $\frac{28}{2} \times \frac{2}{3} \times 0{,}32 \times 0{,}9 \times 10{,}5 = 28{,}3\ cm^2$.
Diamètre de l'induit : 120 *mm*.
Longueur d'une ligne d'induction dans une dent : 1,9 *cm*.
Les deux moitiés sont en parallèle.
Epaisseur : 25,7 *mm*.
Longueur : 105 *mm*.
Section : $2{,}57 \times 10{,}5 \times 0{,}9 = 24{,}25\ cm^2$.
Longueur d'une ligne d'induction : 8,7 *cm*.

BOBINAGES

Inducteurs.

Nombre de spires par pôle : 2 500 (soit 5 000 au total).
Diamètre du fil : 0,7 *mm*.
Isolement : émail.
Longueur moyenne d'une spire : 0,55 *m*.
Longueur totale du fil pour les deux pôles : 2 750 *m*.
Résistance à 15° : 112 Ω; à 75° : 139 Ω.
Intensité : 0,825 *A*.
Densité du courant : 2,15 A/mm^2.
Poids du cuivre : 9,500 *kgf*.

Induit.

Nombre d'encoches : 28.
Nombre de bobines : 28.
Nombre de sections par bobine : 2.
Nombre de spires par section : 6.
Nombre de conducteurs par encoche : 24.
Diamètre du fil : 1,3 *mm*.
Isolement : coton.
Courant par fil : 8,25 *A*.
Densité du courant : 6,2 A/mm^2.
Longueur d'une spire : 0,75 *m*.
Longueur totale : 252 *m*.
Résistance : à 15° : 0,8 Ω; à 75° : 0,93 Ω.
Poids du fil : 3 *kgf*.

COLLECTEUR

Diamètre extérieur : 86 *mm*, longueur utile : 50 *mm*.
Nombre de lames : 56.
Largeur d'une lame : à la partie la plus épaisse : 4,23 *mm*.
à la partie la plus mince : 1,88 *mm*.
Pertes en chaleur Joule au collecteur : 26 *W*.

BALAIS

Nombre : 2 lignes de 2 balais.
Section : 12 × 20 *mm*.
Nombre de lames couvertes par un balai : 2,83.
Pertes par frottement des balais sur le collecteur : 23 *W*.

La dynamo pèse environ 100 kilogrammes

Exercices.

1. En utilisant les dimensions de l'induit et sa vitesse de rotation indiquées dans la leçon, calculer la vitesse linéaire en *m/s* à la périphérie du tambour.

2. Même question pour le collecteur et pour la poulie de la dynamo dont le diamètre est 150 *mm*.

3. Calculer la résistance de l'enroulement de l'induit qui comporte 252 *m* de fil de cuivre de diamètre 1,3 *mm*. Si le résultat trouvé diffère beaucoup de la valeur indiquée dans la leçon, chercher la raison de la différence.

4. Calculer, en watts, la perte en chaleur Joule :
1° dans les inducteurs,
2° dans l'induit.

Dynamo bipolaire à excitation indépendante à vide.

I. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

1. Montage.

Commandons **la dynamo par un moteur dont nous pourrons faire** varier la vitesse.

Avec les *inducteurs*, nous plaçons en série un *rhéostat* à grande résistance et un ampèremètre mesurant de 0 à 2 ampères. L'ensemble est alimenté à 120 volts. On dit que la dynamo est à *excitation séparée ou indépendante.*

Un voltmètre polarisé V (à cadre mobile) est placé aux bornes de l'induit (fig. 1).

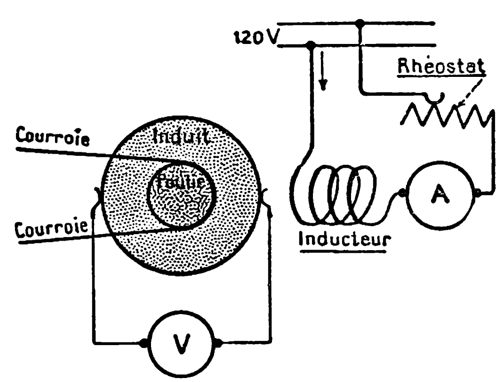


Fig. 1. — Montage d'une dynamo à excitation indépendante à vide.

2. Dans une première série d'expériences, nous faisons varier le sens et la vitesse de rotation de la machine, le courant inducteur étant constant.

Expériences. — *a*) Réglons l'intensité du courant inducteur à 0,65 ampère et la vitesse de la dynamo à 1 600 tours par minute (vitesse mesurée avec un tachymètre).

Le voltmètre aux bornes de l'induit indique qu'il se produit une f. é. m. de 114 volts, d'un certain sens.

b) Inversons le sens de rotation de la machine : la f. é. m. change aussi de sens.

c) Faisons varier la vitesse de la dynamo et notons la f. é. m. correspondante :

Vitesse (n) en tr/mn:	1 600	1 000	1 700
Force électromotrice (E) en volts	114	70	120
Rapport E : *n*	0,071	0,070	0,070.

A l'approximation de nos mesures ces rapports sont égaux.

Donc, ***quand un courant constant passe dans les inducteurs et que l'induit tourne :***

une f. é. m. se produit dans l'induit;

cette f. é. m. change de sens si le sens de rotation est inversé;

elle est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit.

3. Dans une seconde série d'expériences, à vitesse constante, nous faisons varier le sens et l'intensité du courant inducteur.

La vitesse est maintenue à 1 600 tr/mn.

Expériences. — *a*) **Inversons le sens du courant inducteur** : **la** f. é. m. change de sens.

b) Diminuons l'intensité du courant inducteur depuis 1 ampère jusqu'à une valeur nulle, en notant pour quelques valeurs de l'excitation **la f. é. m. correspondante. Nous obtenons :**

intensité dans les inducteurs	1	0,8	0,65	0,5	0,25	0 *ampère*
f. é. m. à 1600 *tr/mn......*	140	127	114	95	48	3 *volts.*

Résumons :

la f. é. m. induite change de sens quand le courant inducteur change de sens;

elle diminue ou croît en même temps que le courant inducteur, mais ne lui est pas proportionnelle.

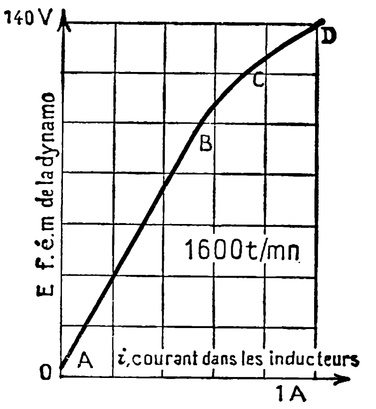


Fig. 2. — **Caractéristique à vide de la** dynamo étudiée. Coude BC peu prononcé, parce que l'entrefer est grand et **le circuit magnétique non saturé.**

4. Traçons la courbe représentative de la f. é. m. en fonction du courant dans les inducteurs.

Désignons par E la f. é. m., par *i* **le courant inducteur. Construisons la courbe E** = *f*(*i*) **à vitesse constante (1 600 tours par minute).**

***a*) Cette courbe (fig. 2) présente**

deux parties sensiblement rectilignes, AB et CD, raccordées par un arc BC. La région CD sera la région de fonctionnement de la machine parce que la f. é. m. y varie peu quand le courant inducteur varie.

b) La partie AB de la courbe ne passe pas par l'origine. La dynamo produit une faible f. é. m., même quand elle n'est plus excitée à cause de l'aimantation rémanente des inducteurs.

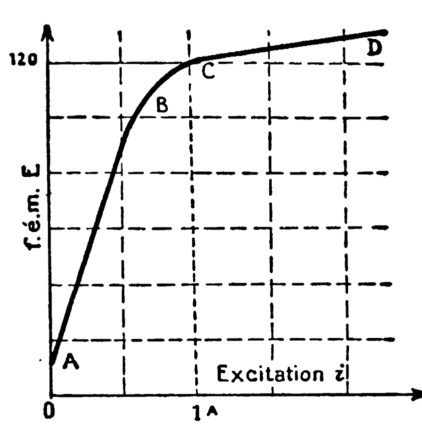


Fig. 3. — Caractéristique à vide d'une dynamo à faible entrefer et circuit magnétique saturé.

c) La courbe renseigne sur le circuit magnétique de la machine. Si les inducteurs sont à faible entrefer et tendent à se saturer, la partie AB de la courbe correspond à une faible variation de i; la partie CD, au contraire, est peu inclinée (fig. 3).

Si l'entrefer est grand, le circuit magnétique ne peut être saturé; les parties AB et CD de la courbe sont alors peu divergentes et raccordées par un arc à peine distinct (fig. 2).

C'est le cas pour la dynamo qui nous sert de type d'étude. Son entrefer est relativement grand (2,5 *mm*). C'est une petite machine qui est d'un fonctionnement peu stable.

d) La courbe tracée, $E = f(i)$, s'appelle ***caractéristique à vide*** ou ***à circuit ouvert***, ou encore ***courbe de magnétisme*** de la dynamo.

II. THÉORIE DE LA PRODUCTION DE LA F. É. M.

5. Distribution du flux magnétique dans la machine excitée et arrêtée.

a) Les bobines inductrices sont disposées pour que l'un des pôles soit N et l'autre S (fig. 4).

En suivant le trajet du flux à partir du noyau du pôle N, on rencontre un épanouissement polaire où l'induction diminue, puisque la section du circuit magnétique devient plus grande. Le flux traverse ensuite l'entrefer normalement à l'induit; l'induction diminue sous les cornes polaires parce que l'entrefer y est plus grand, et par conséquent la réluc-

tance. Le flux se partage ensuite entre les dents et les encoches qui sont sous les pièces polaires, la plus grande partie passe par les dents.

Il traverse ensuite la carcasse de l'induit, moitié au-dessus, moitié au-dessous de l'axe. Puis il rencontre à nouveau des dents ou des encoches, puis un entrefer, l'épanouissement polaire du pôle S, le noyau, un joint magnétique; il se partage par moitié dans la culasse en acier de l'inducteur. Le circuit magnétique se ferme par le joint magnétique du pôle N.

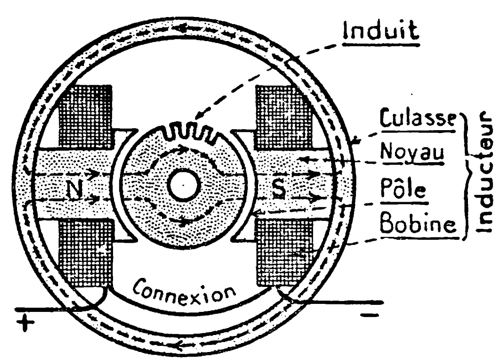


Fig. 4. — Le *flux magnétique*, dans la machine excitée et arrêtée, est *distribué symétriquement* par rapport à l'axe NS.

Ce circuit est donc symétrique par rapport à l'axe NS des bobines inductrices.

Les inducteurs avec leurs bobines et la carcasse de l'induit sont faits pour obtenir un flux important et sensiblement radial dans les entrefers de la dynamo.

b) Pour préciser, donnons quelques indications numériques :

Pour un courant magnétisant de 0,8 *ampère*, le flux dans l'entrefer, sous un épanouissement polaire, est environ 7.10^{-3} *wéber*. C'est le flux utile de la machine.

L'induction atteint près de 2,4 Wb/m^2 dans les dents.

Pour tenir compte des fuites le long du circuit magnétique, il faut produire 9.10^{-3} *wéber* dans les noyaux des pôles : c'est le flux total. Le coefficient d'Hopkinson du circuit magnétique est de $9.10^{-3} : 7.10^{-3} = 1{,}28$.

Le courant inducteur dans les 5 000 spires des bobines inductrices donne 4 000 *ampères-tours* dont 2 300 servent à la production du flux dans l'entrefer et 1 200 dans les dents.

6. Distribution du flux dans la machine quand l'induit tourne.

a) Si le tambour n'était pas creusé d'encoches, en négligeant l'hystérésis, la rotation de l'induit ne modifierait pas la distribution du flux. On pourrait supposer la carcasse de l'induit fixe et l'enroulement qu'elle supporte tournant autour de l'induit en coupant le flux dans l'entrefer.

A cause de la rotation de l'induit, en un point quelconque du fer de sa carcasse, l'induction magnétique varie constamment de direction, de sens et de grandeur. Elle change de sens deux fois par tour. Des courants de Foucault tendent à se produire : c'est pour les diminuer que

l'induit est feuilleté. On remarquera que les feuilles de papier qui isolent les tôles les unes des autres restent toujours dans des plans parallèles au flux : elles s'opposent aux courants de Foucault dont le trajet est normal au flux, mais ne créent pas d'entrefer supplémentaire au passage du flux.

b) Sous les pôles, le flux est bien plus grand dans les dents que dans les encoches. Il en résulte que l'induction *dans les régions des pièces polaires* qui sont en face des dents est plus grande que dans les régions en face des encoches (fig. 5).

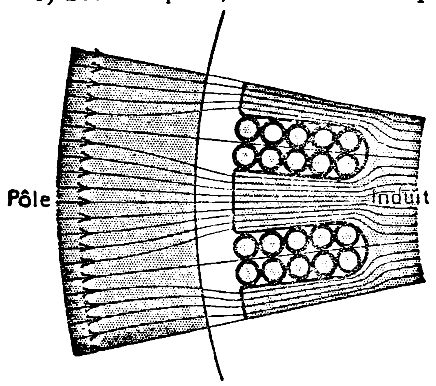


Fig. 5. — Le champ n'est pas uniforme dans la région des pièces polaires voisine de l'entrefer.

Quand l'induit tourne, cette distribution du flux se modifie dans les épanouissements polaires. C'est pour éviter la production correspondante de courants de Foucault que les pôles sont **feuilletés**. Il suffirait d'ailleurs de construire en tôle les épanouissements polaires. On procède ainsi pour les machines de grande taille où les noyaux des pôles en acier coulé, venus de fonderie avec la carcasse, portent des pièces polaires feuilletées.

c) En résumé, quand l'induit tourne, les conducteurs logés dans les encoches coupent normalement le flux qui existe dans l'entrefer.

Effectivement, l'induction dans une encoche, sous un pôle, est bien moindre que l'induction moyenne au voisinage immédiat de l'épanouissement polaire. Mais quand l'encoche a passé complètement sous le pôle, les conducteurs qu'elle contient ont coupé tout le flux sortant de ce pôle. *La f. é. m. moyenne est la même que si l'induit était lisse et les conducteurs disposés à sa périphérie dans l'entrefer.*

7. — F. é. m. produites dans les conducteurs de l'induit.

Supposons d'abord que les connexions entre conducteurs soient supprimées, chaque conducteur étant limité à la partie rectiligne qui se trouve dans une rainure.

Soit C. l'un de ces conducteurs (fig. 6). Le sens de rotation de l'induit est indiqué par la flèche en haut de la figure : le conducteur C se déplace donc sous le pôle nord. Dans ce mouvement, il fauche le flux sortant du pôle; donc une f. é. m. y est induite. La règle des trois doigts de la main

gauche en indique le sens : elle est dirigée de l'avant vers l'arrière de la figure. On repère ce sens par une croix qui représente l'empennage d'une flèche traversant la figure d'avant en arrière.

Ce sens est le même pour tous les conducteurs qui sont tous sous le pôle N.

Quand le conducteur C, en continuant son mouvement, passe devant le pôle S, la *f.é.m.* induite est de sens inverse. Nous indiquons ce sens par un point qui représente la pointe d'une flèche venant de l'arrière vers l'avant.

En somme, *à droite du plan passant par la droite xy et l'axe de l'induit, les f.é.m. sont toutes de même sens; à gauche, elles sont toutes du sens contraire.*

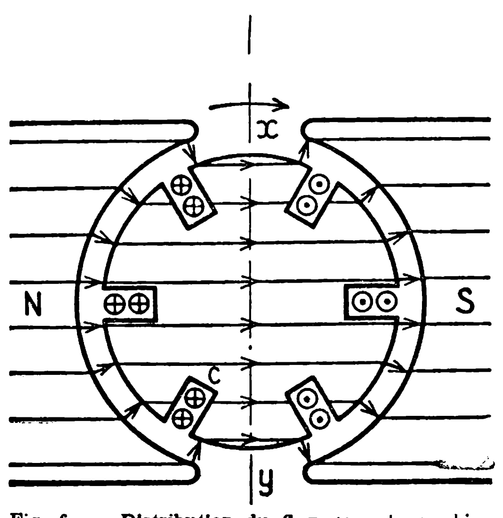


Fig. 6. — Distribution du flux dans la machine excitée et sens des f. é. m. induites dans les conducteurs qui coupent le flux sous les pôles.
La longueur de l'entrefer est très exagérée dans la figure pour rendre visibles les lignes de force.

8. — Connexions entre conducteurs.

La figure 7 indique comment les conducteurs sont connectés entre eux et au collecteur.

Le conducteur 6 est relié sur la face avant de l'induit au conducteur 1 qui lui est presque diamétralement opposé, en passant par la lame 1; le conducteur 1 est relié sur la face arrière au conducteur 8; puis le conducteur 8 est relié à l'avant au conducteur 3 en passant par la lame II du collecteur et ainsi de suite pour revenir finalement au conducteur 6 sur la face arrière et *fermer ainsi l'enroulement.*

Le ***pas de l'enroulement*** est 5 sur la face avant et 7 sur la face arrière.

La figure 7 rapproche trois modes conventionnels de représentation de l'enroulement.

A est la vue simplifiée de la face de l'induit côté collecteur (face avant).

B est un tableau des liaisons des conducteurs entre eux et avec les lames du collecteur.

C est le développement de la surface du cylindre de l'induit, supposée coupée suivant une génératrice entre les conducteurs 1 et 12.

9. — Les f.é.m. induites sont couplées en deux séries égales montées en parallèle.

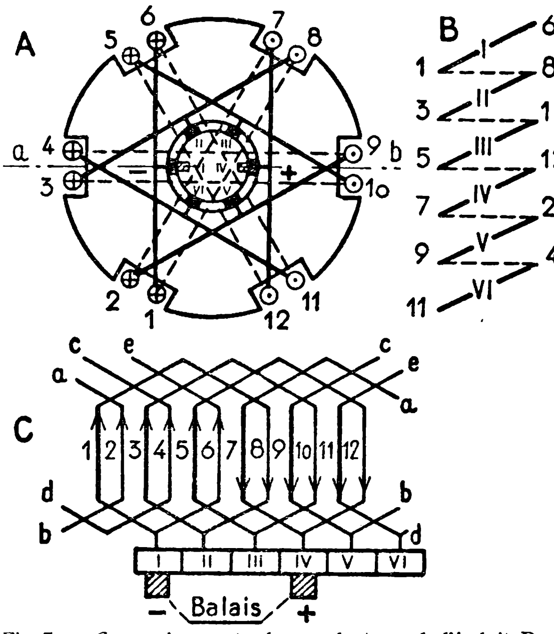


Fig. 7. — *Connexions entre les conducteurs de l'induit.* Dans la figure A, les balais ont été indiqués sur l'axe *ab*, à l'intérieur du collecteur, faute de pouvoir les figurer à leur place réelle à l'extérieur.

Parcourons l'enroulement de l'induit en partant de la lame I du collecteur en tournant vers la gauche (fig. 7, *B* et *C*). Nous suivons une section du bobinage formée par des conducteurs 1 et 8 pour arriver à la lame II du collecteur[1].

Cette section est comparable à un élément de pile puisqu'il s'y produit une f. é. m.

Entre les lames II et III, une autre section comprenant les conducteur 3 et 10 est en série avec la précédente.

En continuant ainsi, nous constatons que trois sections de l'enroulement, assimilables à des éléments de pile, sont couplées en série : sections 1-8, 3-10, 5-12, pour la position de l'induit correspondant à la fig. 7 *A*. — De même les sections 7-12, 9-2, 11-6, sont couplées en série. Et ces deux séries sont en parallèle comme l'indique la figure 8.

Les lames I et IV du collecteur sont les pôles de la batterie ainsi formée.

La distribution des f. é. m.; par rapport à la ligne *ab* fixe dans l'espace, est invariable; elle n'est pas changée par la rotation de l'induit.

Les pôles + et — sont donc toujours les lames du collecteur qui se

1. En réalité, une section d'enroulement d'induit comprend souvent plusieurs spires; par exemple, à partir de la lame I, les conducteurs aller 1 et retour 8 forment une spire. On peut exécuter plusieurs spires semblables avant de joindre le dernier conducteur retour placé en 8 à la lame II (fig. 6, page 33).

trouvent sur cette ligne *ab*. *Les balais sont placés sur cette ligne*, dite ***ligne neutre***, ou ***ligne de calage des balais***.

10. Calcul de la f.é.m. de la dynamo.

Soit : Φ *wébers* le flux dans l'entrefer sous l'un des pôles,
N le nombre des conducteurs de l'induit.
n le nombre de tours par *seconde* de l'induit.

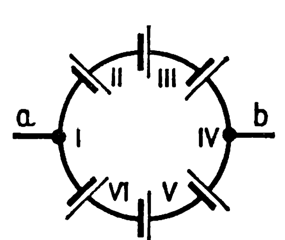


Fig. 8. — Les sections d'enroulement sont couplées comme les éléments de cette pile; en deux séries mises en parallèle.

Un conducteur de l'induit fait 1 tour en $\frac{1}{n}$ seconde. Pendant ce temps, il coupe le flux Φ sous un pôle et le flux Φ sous l'autre pôle, soit $2\,\Phi$. La f.é.m. moyenne induite dans le conducteur est

$$e = \frac{2\Phi}{\frac{1}{n}} = 2n\Phi \text{ volts.}$$

$\frac{N}{2}$ conducteurs sont en série et les deux séries sont en parallèle : donc la f.é.m. de la machine est :

$$E = \frac{N}{2}\,e,$$

$$\boxed{E = N \cdot n \cdot \Phi}$$

volts *conduc.* *tr/s* *wébers*

Cette formule montre que *la f. é. m. d'une dynamo-génératrice est :*

1° *proportionnelle au nombre* N *de conducteurs de l'induit;*

2° *proportionnelle au nombre* n *de tours par seconde de l'induit*, c'est-à-dire à la vitesse de rotation;

3° *proportionnelle au flux inducteur* Φ *émané de l'un des pôles.*

La formule confirme donc et précise les constatations expérimentales faites antérieurement.

Exercices.

1. Expliquer pourquoi les f.é.m. produites dans les conducteurs de l'induit d'une dynamo s'inversent :

a) si l'on inverse le sens de rotation de l'induit,

b) si l'on inverse le sens du flux dans les inducteurs.

2. En utilisant les valeurs numériques données dans les leçons qui précèdent, calculer pour la dynamo décrite :

1° l'induction magnétique dans l'entrefer;

2° l'induction dans les noyaux des pôles, la carcasse des inducteurs, l'armature de l'induit.

3. Une dynamo bipolaire tourne à 1 600 *tr/mn*. L'induit porte 672 conducteurs. Le flux dans l'entrefer sous un pôle est 7.10^{-3} *wéber*. Quelle est la f.é.m. de la dynamo?

4. Une dynamo bipolaire tournant à 1 150 *tr/mn* possède une f.é.m. de 125 *volts*. L'induit porte 620 conducteurs. Quel est le flux sous un pôle?

5. Des f.é.m. s'induisent-elles dans les liaisons entre conducteurs sur les faces avant et arrière de l'induit?

Enroulement d'induit d'une dynamo bipolaire en tambour.

L'induit d'une dynamo comporte un grand nombre de conducteurs. Par exemple, l'induit de celle que nous étudions en possède 672, soit 24 dans chacune de ses 28 encoches. Ces conducteurs constituent 56 sections de 6 spires chacune; ces sections sont groupées en 28 bobines. Il y a 56 lames au collecteur. Ces nombres sont trop grands pour que l'on puisse suivre facilement le mode de couplage des conducteurs.

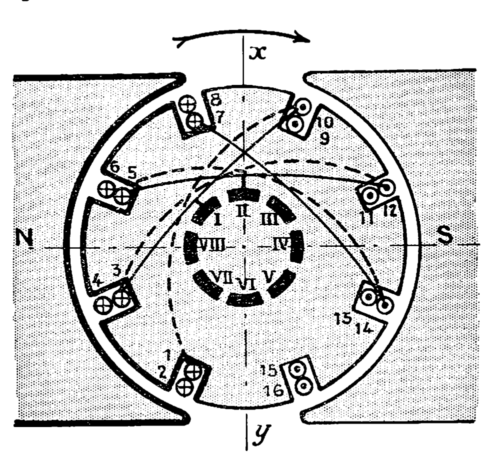


Fig. 1. — Schéma d'un enroulement d'induit simplifié.

Nous supposerons, pour simplifier, que le tambour ne porte que 8 encoches, qu'il n'y a que 8 sections de 1 spire chacune, soit 16 conducteurs. Et comme le *nombre de lames au collecteur est égal à celui des sections* de l'induit, il y a 8 lames au collecteur (fig. 1). Appliquer à un induit réel les règles de bobinage que nous allons établir pour cet induit simplifié ne demande que patience et attention.

1. Les conducteurs de l'enroulement sont toujours en nombre pair.

L'enroulement doit être fermé. Si on le parcourt en partant du côté collecteur, côté avant, après avoir suivi un conducteur d'aller vers l'arrière, il faut revenir vers l'avant par un conducteur de retour et continuer ainsi pour revenir au conducteur de départ. Il y a donc autant de conducteurs d'aller que de conducteurs de retour, soit, au total, *un nombre pair de conducteurs*.

Les conducteurs d'aller sont supposés dans le fond des encoches et numérotés 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15; les conducteurs de retour, à la partie supérieure des encoches sont numérotés 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16.

2. Représentation développée de l'induit.

Pour plus de commodité dans le tracé des schémas, nous supposerons la surface cylindrique extérieure de l'induit déroulée sur un plan.

Les conducteurs d'aller sont figurés en traits forts, les autres en traits fins; on n'a pas dessiné les encoches.

3. Premier mode d'enroulement : enroulement imbriqué[1].

a) Le conducteur d'aller 1 est réuni sur la face arrière de l'induit au conducteur de retour 10. Puisque ces conducteurs sont diamétralement opposés, les f. é. m. qui s'y produisent s'ajoutent à chaque instant.

Sur la face avant de l'induit, le conducteur 10 est connecté au conducteur 3 en passant par la lame I du collecteur et l'on continue ainsi. Le parcours est le suivant :

Conducteurs 1 — 10 3 — 12 5 — 14 7 — 16 9 — 2 11 — 4 13 — 6 15 — 8 1

Collecteur: lames : I II III IV V VI VII VIII

Les barres avec leurs connexions forment, sur le schéma, des boucles

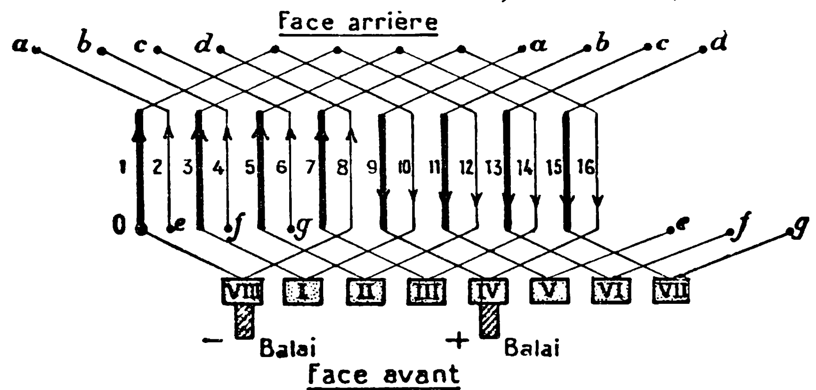


Fig. 2. — *Développement de l'induit : enroulement imbriqué.* Les flèches sur les barres 1, 2, 3... 15, 16, indiquent le sens du courant induit dans ces barres conformément à la figure 1.

qui se recouvrent partiellement : on dit que l'enroulement est *imbriqué.*

Le pas aux rainures est 9, le pas aux lames du collecteur est 1.

Pour la dynamo étudiée au début de cette leçon, le pas aux rainures est 13, aux lames 1.

1. Déjà étudié dans la précédente leçon (§ 8), nous le reprenons ici pour le comparer plus facilement à l'enroulement ondulé

b) On suppose que la f. é. m. induite dans chaque conducteur a la même valeur, soit *e* volts, le sens en est indiqué sur la figure 2.

Si l'on parcourt l'enroulement en partant de l'une des lames du collecteur, de la lame II par exemple, on constate (fig. 3) que la plus grande différence de tension se produit entre les lames IV et VIII. Ces positions du maximum et du minimum de tension ne changent pas quand l'induit tourne, puisque conducteurs ou lames se substituent les uns aux autres dans le mouvement de rotation. On place les balais sur les lames correspondantes suivant un axe dit de *commutation.* La position de cet axe par rapport à la ligne neutre dépend de la forme des connexions. Le plus souvent l'axe de commutation et la ligne neutre sont perpendiculaires.

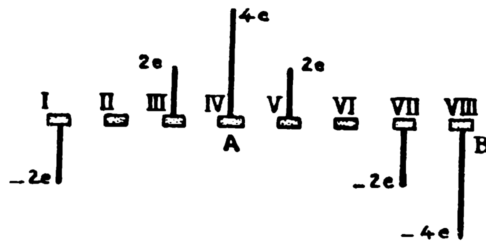


Fig. 3. — Répartition des tensions aux lames du collecteur. Les balais seront placés en A et B.

4. Deuxième mode d'enroulement : enroulement ondulé.

Après avoir réuni, comme il est dit au paragraphe précédent, le conducteur 1 au conducteur 10, on peut continuer la progression des connexions à l'avant dans le même sens et, comme l'indique la figure 4, joindre la barre 10 à la lame I, puis à la barre 3 sans retourner vers l'arrière. Conducteurs et connexions ont, sur le schéma, l'aspect d'une onde : l'enroulement est dit *ondulé.*

Quand il s'agit de machines bipolaires, il n'y a pas de différences de propriétés entre l'enroulement *imbriqué* et l'enroulement *ondulé*.

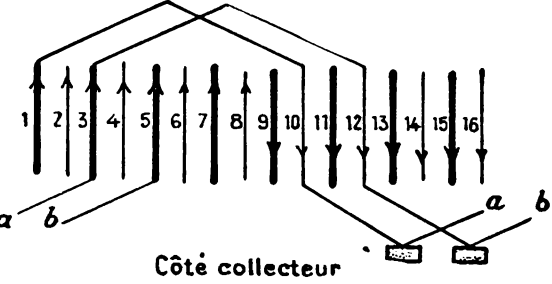


Fig. 4. — Enroulement ondulé. Les flèches sur les barres indiquent le sens du courant induit.

Exercices.

1. Terminer le schéma de la figure 4 et étudier la distribution des potentiels au collecteur.

2. Faire le schéma d'un enroulement imbriqué avec 20 conducteurs, 10 lames au collecteur, pas à l'arrière 9, à l'avant 7, pas au collecteur 1.

3. Faire le schéma d'un enroulement ondulé avec 16 conducteurs, 8 lames au collecteur, pas à l'avant et à l'arrière 7.

4. Examiner s'il est possible de modifier l'induit de la dynamo décrite dans la 55e leçon pour en faire une génératrice à basse tension (de l'ordre de 15 volts), pour électrolyse.

Les modifications possibles ne doivent concerner que l'enroulement d'induit et le collecteur.

5. Imaginer un enroulement imbriqué pour un induit de dynamo bipolaire ayant 40 encoches et 40 lames au collecteur.

Plusieurs solutions sont-elles possibles?

6. En règle générale, il convient de ne faire fonctionner une machine que dans les conditions prévues par son constructeur.

Une dynamo à excitation indépendante a été établie pour fournir normalement 110 *V*. Est-il possible de lui faire donner 220 *V*? Comment?

Quels sont les inconvénients de l'un et l'autre des moyens que l'on pourrait employer?

7. Pour déterminer la caractéristique à vide d'une dynamo à excitation indépendante on a fait deux séries de mesures simultanées de l'excitation, de la f. é. m., de la vitesse de rotation :

1re *série : l'excitation est constamment croissante.*

excitation	i = 0	0,20	0,40	0,80	1,00	1,50	ampère
f. é. m	E = 2,44	44	88	140	144	177	volts
vitesse	N = 1 960	1 950	1 980	2 000	1 940	1 970	t/mn

2e *série : l'excitation est constamment décroissante.*

excitation	i = 1,60	1,40	1,20	0,55	0,20	0	ampère
f. é. m.	E = 176	175	164	115	52,5	9,8	volts
vitesse	N = 1 950	1 980	1 960	1 960	1 950	1 960	t/mn

1° Tracer la caractéristique à vide à la vitesse de 2 000 *t/mn*.

2° Les deux branches de la courbe ne coïncident pas. Pourquoi?

3° Tracer la courbe de la moyenne des f. é. m. déterminées.

Echelles : abscisses : 10 *cm* pour 1 *A*; ordonnées : 1 *cm* pour 10 *V*.

Dynamo bipolaire à excitation indépendante en charge.

1. Montage de la dynamo en charge.

Entraînons la dynamo par un moteur dont nous maintiendrons la vitesse constante de façon que la génératrice tourne à 1 600 tours par minute pendant toutes les expériences.

Un rhéostat dans le circuit inducteur sert à fixer l'excitation à la valeur qui donne 114 volts à vide.

Un ampèremètre mesure le courant débité par l'induit dans un rhéostat capable d'absorber une vingtaine d'ampères sous une centaine de volts.

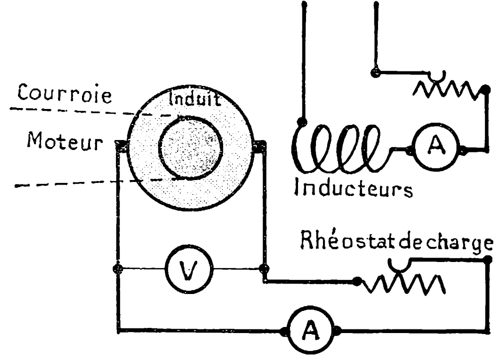


Fig. 1. — Montage d'une dynamo à excitation indépendante en charge.

Un voltmètre mesure la tension aux bornes de l'induit (fig. 1).

2. Comment varie la tension aux bornes de la dynamo en fonction de l'intensité débitée ?

Faisons croître le courant débité en maintenant constantes la vitesse et l'excitation de la génératrice. Mesurons la tension U aux bornes de l'induit correspondant à différentes valeurs de I.

Nous trouvons :

I	0	3	6	8	10	15	18	ampères
U	114	110	105	102	100	90	76	volts

Traçons la courbe U = f(I). On la nomme ***caractéristique externe*** ou ***caractéristique en charge*** de la dynamo (fig. 2).

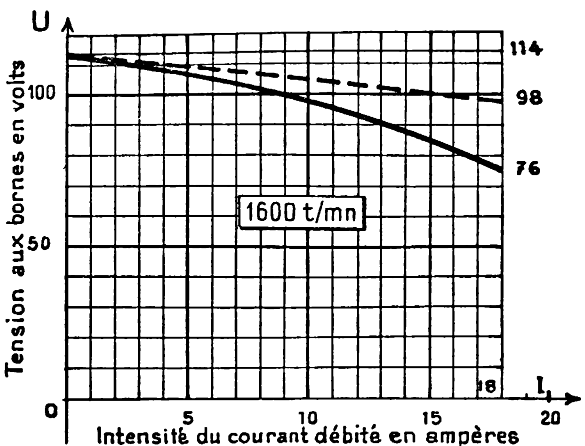


Fig. 2. — **Caractéristique en charge d'une dynamo à excitation indépendante.** — Le courant d'excitation et la vitesse de rotation sont constants.

Cette courbe met en évidence une chute de tension importante qui croît avec l'intensité débitée.

3. Quelles sont les causes de cette baisse de tension?

a) La baisse de tension constatée n'est pas due uniquement à la chute ohmique produite par la résistance de l'enroulement induit. En effet, si la f. é. m. de la génératrice était restée E = 114 volts en charge comme à vide, r = 0,9 Ω étant la résistance de l'induit entre bornes et I le courant débité, on aurait

$$U = 114 - 0{,}9\ I.$$

La courbe U = f(I) serait alors une droite figurée en pointillé sur la figure 2.

Au débit de 18 ampères on aurait eu :

$$U = 114 - 0{,}9 \times 18 = 98 \text{ volts}$$

alors qu'on n'a mesuré que 76 volts.

Il existe donc, au débit de 18 ampères, une chute de tension de

$$98 - 76 = 22 \text{ volts}$$

que la chute ohmique dans l'induit n'explique pas.

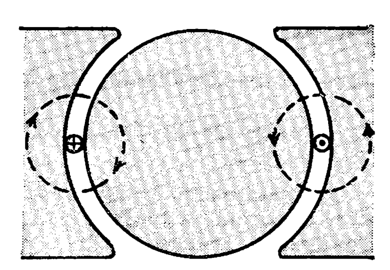


Fig. 3. — **Chaque conducteur de l'induit parcouru par le courant I · 2 produit un champ magnétique**

La f. é. m. n'est donc pas constante en charge. Dans nos expériences, de 114 volts, à vide, elle baisse à 114 — 22 = 92 volts au débit de 18 ampères.

b) Cette diminution de la force électromotrice est due au phénomène appelé ***réaction magnétique d'induit.***

4. Réaction magnétique de l'induit.

Les conducteurs de l'induit, de part et d'autre de la ligne neutre, sont, ainsi que nous l'avons établi, parcourus par des courants de sens contraires (fig. 3 et 3 *bis*). L'intensité de ces courants est I : 2 quand la dynamo fournit I ampères.

La carcasse de l'induit, qui est une masse de fer doux, s'aimante sous l'action de ces courants. Il se produit un champ normal au champ dû aux inducteurs et dirigé sur les figures 3 et 3 *bis* de haut en bas à travers l'induit. En réalité les deux champs se superposent.

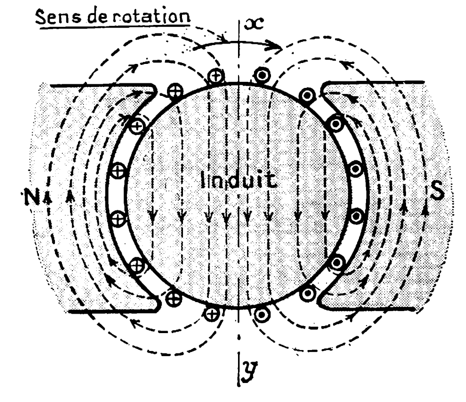


Fig. 3 *bis*. — Champ propre de l'induit dû à l'ensemble des champs produits par les conducteurs de l'induit.

Il en résulte dans les cornes polaires *e* d'entrée des conducteurs sous les pôles une diminution de l'induction, dans les cornes de sortie *s* une augmentation de l'induction, soit, dans l'ensemble, une *distorsion* des lignes d'induction dans le sens de la rotation de l'induit (fig. 4).

Au total, il y a diminution du flux dans les pièces polaires parce que la perméabilité du fer diminuant quand l'induction croît, l'induction augmente moins dans les cornes de sortie qu'elle ne diminue dans les cornes d'entrée. En conséquence, la réaction magnétique d'induit diminue la f. é. m. de la génératrice.

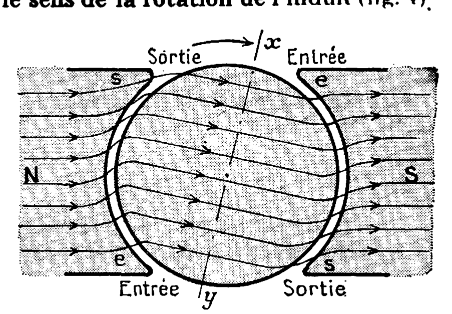


Fig. 4. — Distorsion des lignes d'induction dans le sens du mouvement de rotation de l'induit.

Le champ réel qui est tracé ici est la résultante du champ dû à l'inducteur seul et du champ dû à l'induit seul.

Dans la formule d'Ohm :

$$U = E - rI.$$

appliquée à une dynamo, la valeur qu'il convient de donner à E n'est pas celle de la f. é. m. à vide mais celle qui correspond au débit I.

Par suite de la distorsion du flux, la ligne neutre et la ligne de calage des balais sont déplacées dans le sens de rotation de l'induit.

De plus, parce que l'induction n'est pas uniforme dans l'entrefer, la f. é. m. induite à un instant donné dans une section de l'induit dépend de

sa place sous les pôles : elle est plus grande quand la section est sous les cornes polaires de sortie que lorsqu'elle se trouve sous les cornes d'entrée. La différence de potentiel entre les lames consécutives du collecteur est plus grande pour une région que pour l'autre : des arcs entre lames sont à craindre.

c) Pour *atténuer* la réaction d'induit, quand le constructeur établit le projet de la dynamo, il prévoit d'une part un entrefer beaucoup plus grand que ne l'imposent les conditions mécaniques et, d'autre part, la saturation des pièces polaires.

5. Étincelles aux balais.

Les balais sont calés sur la ligne théorique. Faisons débiter à la machine au moins sa charge normale : des étincelles se produisent aux balais, entre la lame du collecteur et le balai qu'elle quitte, à l'instant où elle le quitte. Elles détérioreraient rapidement les balais et surtout le collecteur.

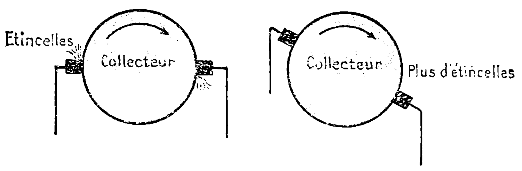


Fig. 5. — Le décalage des balais dans le sens de rotation de l'induit supprime les étincelles aux balais.

Nous les atténuons et même les supprimons en tournant un peu le collier de support des balais dans le sens du mouvement de l'induit (fig. 5).

Cette formation d'étincelles est surtout visible quand la génératrice étudiée est de modèle ancien. Le collier porte-balais des dynamos de vieille fabrication était muni d'une poignée pour faire varier commodément la position de calage suivant la charge [1].

6. Quelle est la cause des étincelles ?

La figure 6 représente un certain nombre de lames sous le balai positif. A l'une de ces lames, telle que A, est soudé le commencement d'une section de l'induit; la fin de cette section est soudée à la lame suivante B. Le sens du courant est indiqué par des flèches. Lorsque la lame C est remplacée sous le balai par la lame B, le courant s'inverse dans la section 3. On dit que cette section est *commutée*.

L'inversion du courant s'accompagne d'un phénomène de self-induction; il se produit dans la section commutée une *f. é. m.* de *commutation* qui est la cause principale des étincelles.

1. Cette manœuvre n'est plus nécessaire avec les dynamos modernes qui sont conçues pour que la position de calage des balais convienne pour toutes les charges; les étincelles aux balais sont si faibles qu'elles ne sont pas nuisibles.

7. Comment on réduit les étincelles et pourquoi le décalage des balais les supprime.

a) On *réduit* la f. é. m. de commutation à la construction de la dynamo en diminuant l'inductance des sections de l'induit. Pour que ces sections aient peu de self, on réduit leur nombre de spires. Il faut en conséquence augmenter le nombre de lames du collecteur.

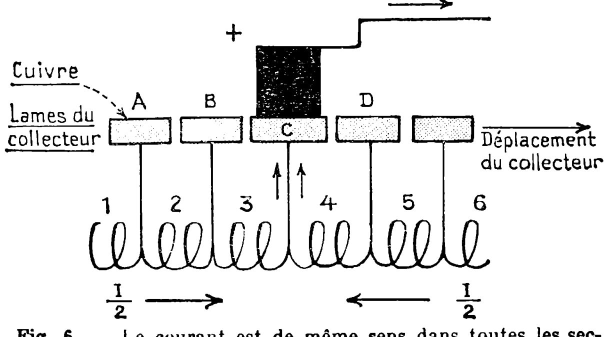


Fig. 6. — Le courant est de même sens dans toutes les sections telles que 1, 2, 3... qui sont à *gauche* du balai. De même dans toutes les sections telles que 4, 5, 6... qui sont à *droite* du balai. Lorsque la lame B du collecteur arrivera sous le balai, le courant aura changé de sens dans la section 3 : il y aura eu *commutation* du courant dans *cette section*.

b) Les constructeurs emploient, pour un modèle déterminé de machines, des balais en charbon dont la composition et la résistance sont choisies pour gêner la formation des étincelles [1].

c) On *supprime* les étincelles par un décalage convenable des balais dans le sens de la rotation de l'induit.

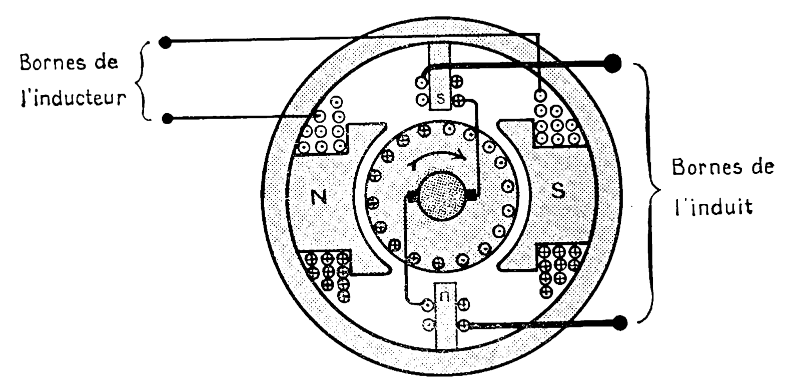


Fig. 7. — **Les pôles auxiliaires *ns* suppriment le décalage des balais. Leurs enroulements sont en série avec l'induit.**

On amène ainsi la section commutée dans une région de l'entrefer où les

1. C'est pourquoi quand les balais d'une génératrice ou d'un moteur à courant continu sont usés, il faut les remplacer par des balais de la même qualité et non par des balais quelconques.

inducteurs produisent une f. é. m. égale et opposée à la f. é. m. de commutation.

d) Un moyen préférable, quoique plus coûteux, consiste à placer en face des sections commutées, c'est-à-dire sur la ligne neutre de la machine, des pôles de petites dimensions, excités par le courant de l'induit et dont le champ produit, dans les sections qui passent sous les balais, une f. é. m. de valeur égale et de sens contraire à la f. é. m. de commutation (fig. 7). Ces pôles se nomment *pôles auxiliaires* ou *pôles de commutation.*

Il est alors possible de laisser les balais, à toute charge, sur l'axe théorique de commutation.

Toutes les machines modernes de puissance supérieure à quelques kilowatts sont munies de pôles de commutation.

Exercices.

1. On fait fonctionner une dynamo à excitation indépendante et à vitesse constante. Pour différentes intensités du courant débité par la machine, on mesure les valeurs correspondantes de la tension aux bornes. On trouve :

I	0	7,5	15,3	20,4	21,6	ampères
U	128	122	116	108	107	volts

Tracer la caractéristique externe de la génératrice.

Tracer sur la même figure la courbe de la chute ohmique dans l'induit dont la résistance est 0,4 Ω.

Déduire de ces deux courbes la courbe représentative de la baisse de force électro motrice en fonction de l'intensité débitée par l'induit.

2. Une machine bipolaire est bobinée en tambour avec un fil dont la section est 5 mm^2. Le nombre de conducteurs est 760. L'induit tourne à la vitesse de 540 *t/mn*. Il débite dans un circuit extérieur 40 A sous la tension de 110 V. La résistance de l'induit mesurée entre balais est 0,15 Ω.

Calculer :

1° la f. é. m. produite en charge,

2° le flux inducteur,

3° la densité de courant dans les fils de l'induit,

4° l'énergie perdue en chaleur Joule en 1 heure dans l'induit.

Différents modes d'excitation des dynamos

1. Machine magnéto-électrique.

Les inducteurs les plus simples d'une génératrice à courant continu sont constitués par des aimants en fer à cheval munis de pièces polaires alésées pour recevoir l'induit.

Une telle machine se nomme *magnéto à courant continu.*

Les aimants permanents ne produisent que des flux assez faibles. Aussi les magnétos sont-elles peu puissantes. Ce ne sont pas des machines industrielles. On n'en fabrique que de petite taille, d'une puissance de quelques watts.

Dans ces machines, le flux est bien constant. A circuit ouvert, donc sans réaction d'induit, la f. é. m. produite est exactement proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit. On peut graduer un voltmètre monté aux bornes d'une magnéto directement en tours par minute. La magnéto sert de *tachymètre.*

2. Dynamo à excitation indépendante ou séparée.

Le courant qui aimante les inducteurs est fourni par une source indépendante. Nous avons étudié comment une telle machine se comporte à vide et en charge.

Quand la source de courant est une batterie d'accumulateurs, l'excitation est bien constante et le fonctionnement de la machine très stable. Mais c'est une sujétion gênante de recourir à un courant auxiliaire. Aussi n'utilise-t-on guère industriellement ce mode d'excitation. Il est employé pour les dynamos à basse tension (10 ou 12 volts) et grande intensité (plus de 500 ampères), qui servent à l'électrolyse et aussi pour les survolteurs dont on se sert parfois pour charger les batteries d'accumulateurs.

3. Dynamo auto-excitatrice.

Le courant qui passe dans les bobines inductrices est fourni par la machine elle-même.

a) Le circuit inducteur peut être monté en *dérivation* aux bornes de

l'induit. La machine se nomme ***dynamo en dérivation***[1] ou ***dynamo shunt*** (fig. 1).

Afin de ne prélever pour l'excitation qu'une faible fraction du courant produit par la génératrice (2 à 3 pour 100 dans les machines puissantes) et obtenir quand même le nombre d'ampères-tours nécessaires, les bobines inductrices sont faites d'un grand nombre de spires de fil fin.

La petite machine de 1 800 watts que nous avons étudiée dans les leçons précédentes est construite pour être employée comme dynamo en dérivation. Les deux bobines inductrices ont chacune 2 500 spires de fil de 0,7 *mm*. Leur résistance totale à chaud est 139 ohms. Le courant normal d'excitation est 0,825 A, soit environ 5 % du courant de la dynamo en charge.

b) Si les inducteurs sont montés en série avec l'induit et le circuit extérieur, la machine est une ***dynamo en série*** (fig. 2).

Tout le courant produit par la génératrice traverse les bobines inductrices. Pour obtenir le nombre d'ampères-tours nécessaires à l'aimantation, il suffit que ces bobines aient peu de spires. Le fil en est gros pour diminuer la résistance.

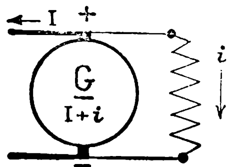


Fig. 1. — Schéma d'une dynamo à excitation en dérivation ou dynamo shunt.

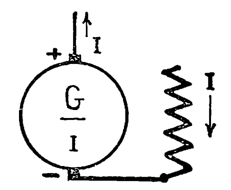


Fig. 2. — Schéma d'une dynamo à excitation en série ou dynamo série.

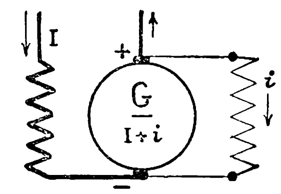


Fig. 3. — Schéma d'une dynamo à excitation composée ou dynamo compound.

Par exemple, pour transformer la dynamo de 1 800 W étudiée en dynamo série, on remplacerait les deux bobines inductrices par deux autres de chacune 130 spires de fil de 2,5 *mm*. La résistance des inducteurs serait alors 0,50 Ω.

c) Il est possible d'exciter une machine à la fois en dérivation et en série, on la nomme alors ***dynamo à excitation composée ou dynamo compound*** (fig. 3).

Par exemple, sur chaque pôle d'une petite dynamo compound 1 800 W, 115 V, se trouvent une bobine shunt de 2 200 spires en fil de 0,65 *mm* et une bobine série[2] de 55 spires de fil de 2,6 *mm*.

4. Conditions d'amorçage d'une dynamo auto-excitatrice.

Montons en série avec les bobines inductrices de la dynamo de 1 800 W un rhéostat d'une centaine d'ohms. L'ensemble est mis en dérivation

1. Les appellations dynamo shunt et dynamo compound ne font pas partie du vocabulaire électrotechnique établi par le Comité électrotechnique français. Nous les utiliserons cependant parce qu'elles sont d'un emploi fréquent.
2. L'importance de la bobine série par rapport à la bobine shunt est moins grande quand il s'agit d'une dynamo puissante.

aux bornes de l'induit. La machine est ainsi équipée en dynamo shunt. Le rhéostat se nomme *rhéostat d'excitation* ou *rhéostat de champ*. Un voltmètre est placé aux bornes de l'induit (fig. 4).

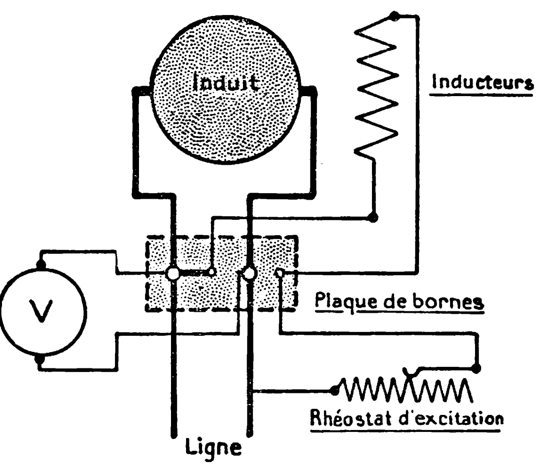


Fig. 4. — Montage d'une ***génératrice shunt*** avec un ***rhéostat d'excitation.***

a) *Faisons tourner la machine à sa vitesse normale successivement dans les deux sens de rotation.*

Dans l'un de ces sens, le voltmètre n'indique aucune f. é. m. La dynamo ne *s'amorce* pas.

Dans l'autre sens, une f. é. m. se produit. Si une petite partie seulement du rhéostat est en circuit, cette f. é. m. croît très vite; en quelques secondes elle atteint plus de 100 volts et se stabilise. La dynamo est *amorcée.*

L'examen de la *caractéristique à vide* tracée, pour cette machine, dans la 6e leçon et reproduite figure 5 fournit l'explication des faits constatés.

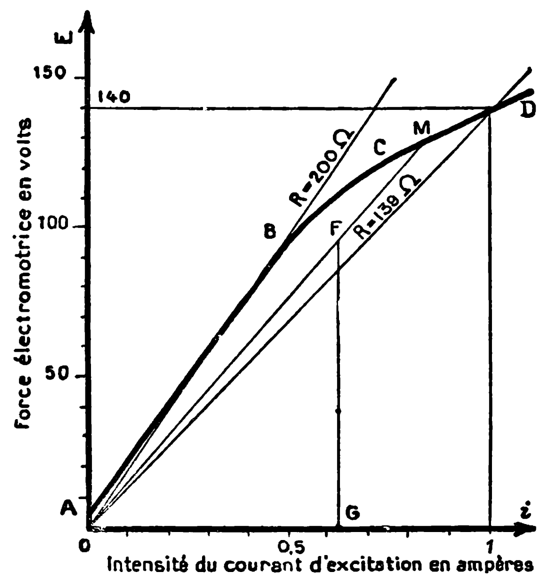


Fig. 5. — Caractéristique à circuit ouvert d'une dynamo auto-excitatrice en dérivation.

Par suite de leur aimantation antérieure, les inducteurs ont conservé une faible aimantation réma-

nente. Le flux qui en résulte produit, quand le circuit inducteur est ouvert, une f. é. m. peu élevée (de l'ordre de 3 volts). Si le courant, très faible, que cette f. é. m. donne dans le circuit inducteur, quand il est connecté en dérivation sur l'induit, tend à diminuer le flux rémanent, la machine ne s'amorce pas. Si le sens du courant correspond à une augmentation du flux, la f. é. m. croît, le courant inducteur aussi, la machine s'amorce.

Au lieu de changer le sens de rotation, on aurait pu produire l'amorçage en intervertissant, à la plaque de bornes de la machine, les connexions des inducteurs avec l'induit.

b) Manœuvrons la manette du rhéostat d'excitation.

La *tension aux bornes* de la machine varie depuis 16 volts quand tout le rhéostat est en circuit, jusqu'à 140 volts quand il est hors circuit et que les bobines inductrices sont montées directement aux bornes de l'induit.

Il est possible, en se servant de la caractéristique *à vide de la dynamo à excitation indépendante* de déterminer la f. é. m. qui correspond à une valeur donnée de la résistance totale R du circuit inducteur. Cette résistance est la somme de celles des bobines inductrices, de la partie du rhéostat de champ laissée dans le circuit et de la résistance de l'induit.

Pour obtenir la caractéristique à vide (6e leçon), on a porté en abscisses les intensités du courant d'excitation et en ordonnées les valeurs de la f. é. m. de l'induit. Sur la même figure, avec les mêmes échelles, traçons la courbe $u = Ri$ de la tension aux bornes du circuit inducteur quand sa résistance totale est R en fonction de l'intensité i d'un courant dans ce circuit. Cette courbe est une droite OF telle que GF = OG × R. Elle coupe la caractéristique au point M. Donc en ce point, la f. é. m. E est égale à celle qui produit le courant i dans le circuit inducteur. C'est le point de fonctionnement de la dynamo pour la résistance R du circuit inducteur.

D'autres droites peuvent être tracées pour différentes valeurs de R. Celle qui correspond à la résistance des bobines inductrices (139 Ω) sans rhéostat montre que la f. é. m. maximum de la machine à sa vitesse normale est de 140 volts. Celles qui se confondent presque avec la branche BC de la caractéristique indiquent que pour une variation de quelques ohms de la résistance du circuit inducteur, quand cette résistance est d'environ 200 Ω, la f. é. m. de l'induit varie beaucoup : on dit que 200 Ω est la ***résistance d'amorçage*** que le circuit inducteur ne doit pas dépasser.

En résumé, pour qu'une dynamo shunt s'amorce, il faut :

1° que le sens de rotation de l'induit, pour un couplage déterminé de l'inducteur et de l'induit, soit convenable;

2° que la résistance du circuit inducteur ne soit pas trop grande.

Les conditions d'amorçage d'une dynamo série sont analogues, ainsi que nous le verrons plus loin. Évidemment, la machine série ne s'amorce pas à circuit ouvert.

1. La résistance de l'induit peut être négligée parce qu'elle est faible par rapport à celle des bobines inductrices.

Exercices.

1. Une dynamo shunt fournit dans le circuit d'utilisation 18 A sous 116 V. Le courant dans les inducteurs est 1,75 A.

Calculer :

1° la résistance des inducteurs;

2° la puissance employée à l'excitation;

3° le courant total dans l'induit;

4° la perte en watts dans les conducteurs de l'induit dont la résistance est 0,44 Ω;

5° la puissance électrique totale de la machine;

6° le rapport de la puissance employée à l'excitation à la puissance totale de la dynamo (exprimé en tant pour cent).

2. Une dynamo shunt débite 15,7 A sous 115 V. Le courant dans les inducteurs est 0,825 A. La résistance de l'induit est 0,93 Ω. On demande :

1° le courant dans l'induit;

2° la chute de tension ohmique dans l'induit;

3° la f. é. m. de la dynamo.

3. Une dynamo shunt doit débiter 80 A sous 220 V à ses bornes. Sa puissance utile est 95 % de sa puissance électrique totale. Les pertes se répartissent comme suit : 2 % de la puissance totale dans l'induit, 3 % dans les inducteurs.

Chercher :

1° la puissance électrique totale,

2° la puissance perdue dans les inducteurs,

3° le courant d'excitation,

4° la résistance des inducteurs,

5° la puissance perdue dans l'induit,

6° le courant dans l'induit,

7° la résistance de l'induit,

8° la chute de tension ohmique dans l'induit,

9° la f. é. m. de la machine.

4. Une dynamo à excitation indépendante a donné à vide, à 1 000 *tr/mn*, en faisant varier le courant d'excitation i, les valeurs suivantes pour la f. é. m. E :

i = 0,25	0,50	0,80	1,00	1,40	1,70	2,00 *A*
E = 50	94	122	133	144	151	155 *V*

La résistance du circuit inducteur est 113 Ω.

1° On branche le circuit inducteur aux bornes de l'induit sans rhéostat de champ et l'on obtient une dynamo excitée en dérivation.

a) Quelle est la f. é. m. à vide de la génératrice quand elle tourne à 1 000 *tr/mn?*

b) A quelle vitesse doit tourner l'induit pour que la f. é. m. soit 130 *V*?

2° On introduit un rhéostat de champ dans le circuit inducteur.

c) Quelle doit être la résistance de ce rhéostat pour que la dynamo donne 130 *V* à vide à la vitesse de 1 000 *tr/mn?*

d) Pour quelle résistance du rhéostat la machine se désamorce-t-elle à vide en tournant à 1 000 *tr/mn.?*

e) En conservant cette résistance dans le circuit inducteur, on monte la vitesse à 1 200 *tr/mn*. Que devient la f. é. m.?

Propriétés des dynamos à excitation en série ou en dérivation ou composée.

A. DYNAMO A EXCITATION EN SÉRIE

1. Amorçage de la machine.

Expériences. — Installons une dynamo série 220 V, 15 A, pour la faire tourner à 1400 *tr/mn* et débiter du courant dans un rhéostat d'environ 40 Ω. Un ampèremètre est en série avec le rhéostat; un voltmètre est monté aux bornes de l'induit.

Nous constatons qu'à circuit ouvert, la machine n'a pas de f. é. m. C'est qu'en effet, puisqu'il n'y a pas de courant dans les bobines inductrices, la dynamo n'est pas excitée.

Fermons le circuit extérieur sur toute la résistance du rhéostat; l'ampèremètre n'indique aucun courant.

Diminuons progressivement la résistance du circuit. Si le sens de rotation est convenable, pour une résistance déterminée, la dynamo donne brusquement une f. é. m. élevée. Elle est *amorcée.*

Il existe donc une résistance du circuit extérieur au-dessus de laquelle la machine série ne s'amorce pas.

2. Caractéristique en charge.

a) *Mesurons la tension U aux bornes de l'induit pour différentes intensités débitées I, la vitesse de la machine étant maintenue constante*
Nous trouvons :

I	6	9	12	15	18	ampères
U	165	209	220	204	182	volts

Traçons la courbe $U = f(I)$ de la tension aux bornes en fonction du débit (fig. 1).

C'est ***la caractéristique en charge*** ou ***externe*** de la machine.

b) La courbe présente trois parties : l'une OA à peu près rectiligne, où la tension croît très vite avec l'intensité, correspond à l'amorçage; une autre, AB, région de fonctionnement normal de la machine ; enfin, une branche plongeante BC où la tension diminue rapidement.

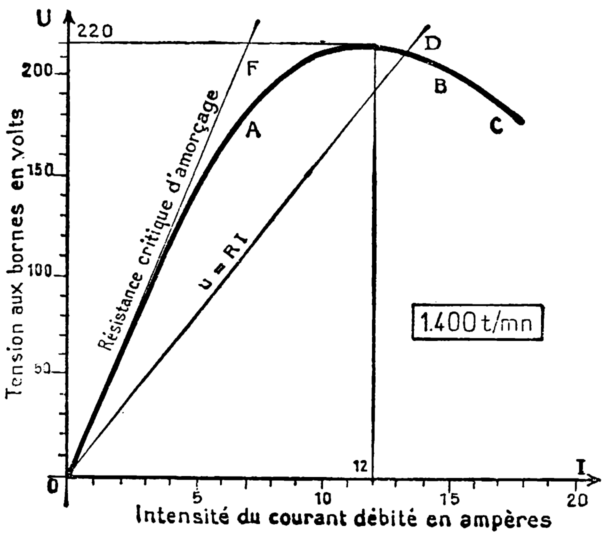


Fig. 1. — Caractéristique en charge d'une dynamo série (Vitesse constante; résistance entre bornes variable).

Si l'on trace sur la figure la droite OD qui représente la fonction $u = RI$, c'est-à-dire la tension aux extrémités d'une résistance R pour un courant d'intensité variable I, le point D est le point de fonctionnement de la dynamo pour la résistance R du circuit.

La position limite des droites telles que OD est OF tangente en O à la caractéristique. La résistance correspondant à cette droite, 28 Ω dans le cas de notre dynamo, est la ***résistance critique d'amorçage***. Pour des résistances du circuit plus grandes, cette dynamo série ne s'amorce pas.

3. Les dynamos série ne sont pas employées comme génératrices.

Un réseau normal de distribution d'énergie électrique est maintenu en permanence sous tension sensiblement constante pour que l'on puisse y brancher en dérivation, quand on le désire, des appareils récepteurs. Même si, à certaines périodes, aucun récepteur n'est en fonctionnement, la tension normale en ligne doit être assurée.

Ce résultat ne peut être obtenu avec une génératrice série puisqu'elle ne s'amorce pas à vide.

Mentionnons cependant qu'il existe quelques réseaux de distribution à

intensité constante pour l'alimentation desquels on utilise des dynamos série.

Si elles sont peu employées comme génératrices, les machines série sont très utilisées comme moteurs de levage ou de traction, comme nous le verrons ultérieurement.

B. DYNAMO EXCITÉE EN DÉRIVATION

Installons une dynamo shunt, 1 800 watts, 115 volts, tournant à 1600 tours par minute, pour la faire débiter dans un rhéostat d'environ 40 ohms. Un rhéostat de champ est placé dans le circuit inducteur. Un ampèremètre mesure le débit, un voltmètre donne la valeur de la tension aux bornes de l'induit.

4. Amorçage de la machine.

Nous avons vu qu'elle s'amorce en circuit ouvert [1]. Réglons la tension à vide à 114 volts.

5. Caractéristique en charge de la dynamo shunt.

Mesurons la tension U aux bornes de l'induit pour différentes valeurs du courant débité I, *la vitesse de la machine restant constante, ainsi que la résistance du circuit inducteur.*

Nous trouvons :

I	0	3,2	6,2	8,3	9,6	13	ampères
U	114	107	99	89,5	82,5	47	volts

Si nous continuons, quand l'intensité atteint 13 ampères, à diminuer la résistance du circuit extérieur, l'intensité diminue au lieu de croître et la machine se désamorce.

Une dynamo shunt peut donc être mise en court-circuit sans inconvénient [2].

b) Traçons la courbe $U = f\ (I)$; c'est *caractéristique en charge* ou *externe* de la dynamo shunt (fig. 2).

Cette courbe ressemble à la caractéristique en charge de la dynamo à excitation séparée (8e leçon). Elle montre que la tension aux bornes

1. A circuit ouvert, puisque le circuit inducteur est connecté aux bornes de l'induit, la machine fonctionne comme une dynamo série. C'est pourquoi les conditions d'amorçage des deux types de machines sont analogues.

2. Il ne faut pas que la mise en court-circuit soit brutale parce que les inducteurs ne se désaimantent pas instantanément. Un court-circuit brusque peut détériorer la machine.

d'une dynamo shunt diminue lorsque le débit de la machine augmente. Cette diminution est plus grande à égalité d'intensité débitée que dans le cas de l'excitation séparée.

Que l'excitation soit *indépendante ou en dérivation*, deux causes agissent pour provoquer la baisse de tension en charge : la *chute ohmique* dans l'induit et la *réaction d'induit.*

Dans le cas de l'excitation *shunt*, une *troisième cause* intervient : R étant la résistance totale du circuit inducteur, U la tension aux bornes de l'induit, l'intensité du courant inducteur est $i = U : R$; puisque la chute

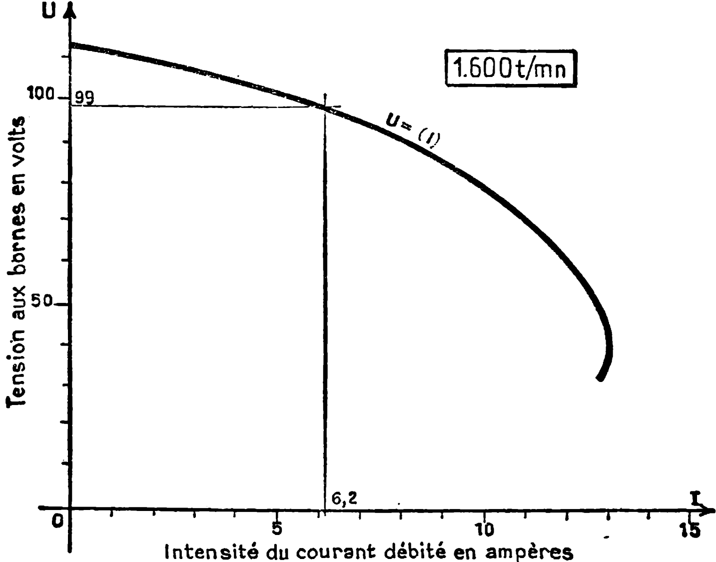


Fig. 2. — Caractéristique en charge d'une dynamo en dérivation (**Vitesse de** rotation **constante, résistance du circuit inducteur constante**).

ohmique dans l'induit et la réaction d'induit réduisent U, *le courant i diminue* proportionnellement; la f. é. m. de la machine, et par suite la tension aux bornes, baissent d'une quantité supplémentaire.

6. Réglage de la tension aux bornes d'une dynamo shunt.

Il est possible de maintenir en charge la tension aux bornes à la même valeur qu'à vide en diminuant convenablement la résistance du circuit inducteur par la manœuvre du rhéostat de champ.

Fixons-nous, par exemple, deux valeurs voisines U_1 et U_2 entre lesquelles nous voulons maintenir la tension aux bornes.

Dans la figure 3, on a tracé les caractéristiques en charge pour différentes valeurs R_1, R_2, R_3 de la résistance du circuit inducteur. Les parties *ab*, *cd*, *ef*, de ces courbes indiquent comment varie la tension à charge croissante de la machine lorsque, chaque fois que la limite inférieure de la tension est atteinte, on manœuvre le rhéostat d'excitation pour ramener la tension à sa limite supérieure.

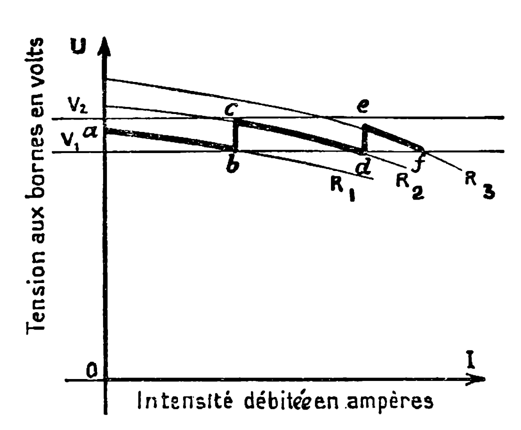


Fig. 3. — Réglage de la tension aux bornes d'une dynamo shunt par le rhéostat de champ.

7. La dynamo shunt est très employée comme génératrice.

La dynamo shunt :

parce qu'elle s'amorce à vide;

parce qu'elle donne, en manœuvrant le rhéostat de champ, une tension pratiquement constante;

est employée comme génératrice d'alimentation des réseaux à tension constante. Comme ceux-ci sont de beaucoup les plus utilisés, la génératrice shunt est la génératrice normalement employée

C. DYNAMO A EXCITATION COMPOSÉE

8. Caractéristique en charge.

En procédant comme avec la machine shunt, mesurons la tension aux bornes d'une dynamo compound pour différentes valeurs de l'intensité dans le circuit extérieur, la vitesse restant constante ainsi que la résistance du rhéostat de champ (fig. 5).

Nous trouvons :

I	0	3	5	10	15	18	ampères
U	121	124	125	125	123	121	volts

Traçons la courbe correspondante (fig. 4). Nous constatons :

1° que la dynamo s'amorce à vide. Il n'y a pas, alors, de courant dans l'enroulement série et la machine est une dynamo shunt;

2° qu'en charge, la tension aux bornes, à quelques volts près, reste

constante. Plus précisément, la tension est la même pour la marche à vide et pour le fonctionnement à pleine charge.

C'est parce que les bobines séries, traversées par le courant débité, augmentent le flux utile et compensent la chute de tension qui se produit quand l'enroulement shunt intervient seul.

Il est même possible, si les appareils récepteurs sont éloignés de la génératrice, de compenser en outre, en augmentant un peu le nombre des spires de l'enroulement série, la chute de tension qui se produit en charge dans la ligne reliant la génératrice aux récepteurs. La tension aux bornes de la dynamo croît un peu quand le débit augmente, mais la tension aux bornes des récepteurs reste à peu près constante. Une telle machine est dite *hypercompound*.

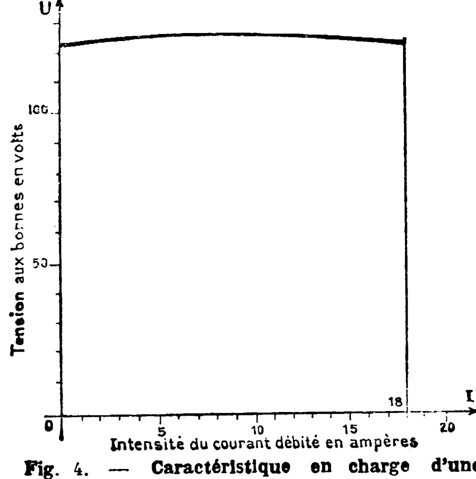


Fig. 4. — Caractéristique en charge d'une dynamo compound.

9. Usages de la dynamo compound.

Parce que les machines compound possèdent, en plus des propriétés des machines shunt, une constance de tension aux bornes qui dispense d'un réglage fréquent par le rhéostat de champ, elles sont employées pour l'alimentation des **réseaux** de distribution à courant continu d'éclairage et de traction.

La plupart des génératrices de courant continu de fabrication récente comportent des pôles auxiliaires, un enroulement shunt et un enroulement série.

La figure 5 donne le schéma des connexions de l'une de ces machines. Celles de ces connexions

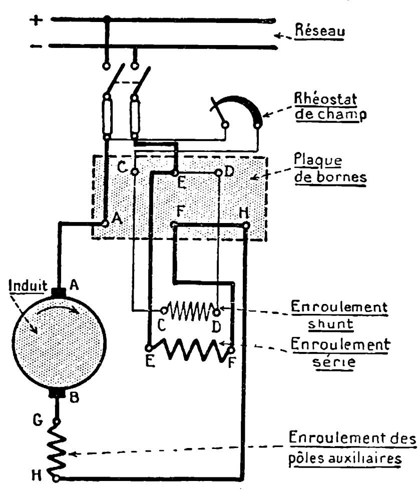


Fig. 5. — Schéma des connexions d'une dynamo compound à pôles auxiliaires, rotation à droite.

qui sont à la partie inférieure du schéma sous la plaque de bornes sont intérieures à la dynamo et réalisées par le constructeur. Les autres sont faites par le monteur électricien qui installe la machine.

Exercices.

1. Les rhéostats de champ des dynamos shunt sont faits de fil fin. Pourquoi?

Leur résistance est assez grande, la moitié environ de celle des bobines. Pourquoi?

Ils ont beaucoup de plots. Pourquoi?

Ils n'ont pas de plot mort. Pourquoi?

2. Comment se comportait en charge une dynamo compound, si, par suite d'une erreur dans les connexions, l'enroulement série s'opposait à l'enroulement shunt?

Ce mode de compoundage dit *différentiel* est parfois intentionnellement réalisé dans les génératrices qui servent à la soudure à l'arc. Pourquoi?

3. Indiquer le sens du courant dans les différents circuits de la machine dont le schéma est donné figure 5.

Ce schéma convient quand la machine vue du côté poulie a son sens de rotation à droite. Si pour des raisons d'installation mécanique, il est nécessaire de faire tourner la machine à gauche, le sens du courant dans les inducteurs ne doit pas changer. Pourquoi?

1° Que devient le sens du courant dans l'induit?

2° Quel doit être le sens du courant dans les pôles auxiliaires?

3° Comment faut-il modifier les connexions extérieures à la plaque de bornes? (Faire le schéma pour le nouveau sens de rotation.)

4. Une dynamo compound de 15 *k*W, 125 volts, a donné aux essais à 1 150 *tr/mn* :

I	0	60	96	117	150	ampères
U	113	123	124	122	119	volts

Tracer la caractéristique en charge.

L'enroulement shunt a une résistance de 43 Ω ; l'enroulement série, une résistance de 0,01 Ω . Calculer la puissance en watts employée à l'excitation pour les différents débits. Tracer la courbe des variations de cette puissance en fonction du débit sur le même graphique que la caractéristique.

Dynamos multipolaires.

On ne construit guère de dynamos bipolaires dépassant 5 kilowatts. Pour des puissances supérieures, afin de mieux utiliser la matière et de diminuer les dimensions d'encombrement, on munit l'anneau circulaire constituant le bâti de la machine de plusieurs paires de pôles (fig. 1). La dynamo est *multipolaire*. Il existe de grosses génératrices ayant 24 pôles et même davantage.

1. Constitution de l'inducteur.

Pour que pôles Nord et pôles Sud alternent sur la culasse de la machine, le nombre des pôles est toujours pair.

Chaque pôle, rapporté ou venu de fonte avec le bâti, est pourvu de pièces polaires, feuilletées.

Les bobines inductrices sont montées en série.

2. Induit, collecteur et balais de dynamos multipolaires.

L'induit en tambour denté diffère seulement d'un tambour de machine bipolaire parce qu'il est évidé dans sa partie centrale et claveté sur l'arbre par l'intermédiaire d'un croisillon en fonte (fig. 2).

Le collecteur et les balais sont identiques à ceux des dynamos à deux pôles.

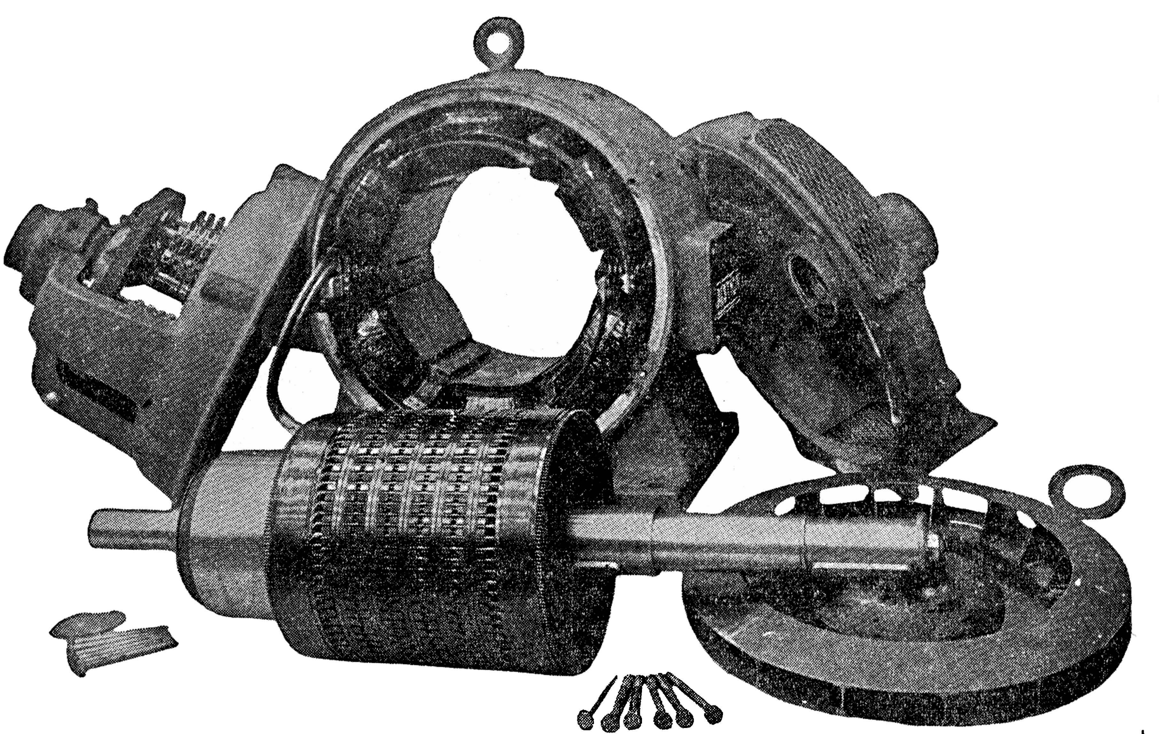
3. Distribution du flux dans une machine tétrapolaire.

La figure 2 représente le circuit magnétique d'une machine tétrapolaire. A partir d'un pôle Nord, N_1, en suivant une ligne de force, on rencontre une pièce polaire, un entrefer où le flux est sensiblement radial et uniforme, puis les dents et les encoches de l'induit. Le flux se partage alors vers les pôles S_1 et S_2 voisins. Le circuit se continue de chaque côté par des dents et des encoches, des entrefers, des pièces polaires, les noyaux S_1 et S_2, et se ferme par la culasse.

La partie centrale du tambour n'intervient pas dans le circuit magnétique; c'est pourquoi l'induit peut être évidé.

4. F. é. m. produite dans les conducteurs de l'induit.

On suppose que les conducteurs sont des barres sans connexions entre elles et logées dans les rainures du tambour.



Cliché Alsthom.

Fig. 1. — *Dynamo multipolaire démontée.*

Au milieu, au premier plan, l'*induit* claveté sur son arbre; **au second plan, l'*inducteur*.**

A gauche, flasque portant les *balais* et l'un des paliers.

A droite, flasque portant l'autre palier, et, **en avant**, le **ventilateur.**

Remarquez, entre les bobines inductrices, les pôles auxiliaires.

Le sens de rotation de l'induit est indiqué sur la figure 2 par une flèche.

En appliquant la règle des trois doigts (main gauche), on détermine le sens de la f. é. m. dans ces conducteurs.

D'après ce sens, les conducteurs se répartissent en quatre groupes, soit un groupe par quadrant de l'induit correspondant à chaque pôle.

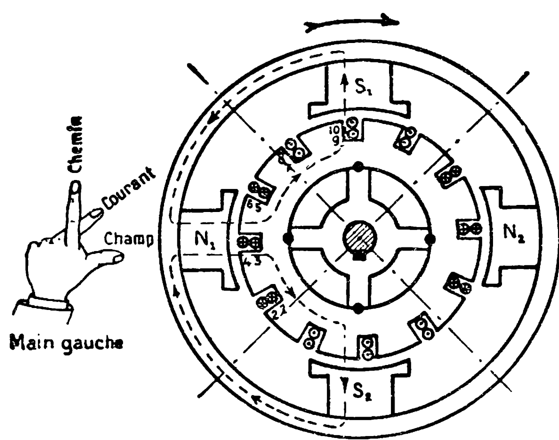


Fig. 2. — Circuit magnétique d'une machine tétrapolaire Dans les conducteurs de l'induit qui passent sous un pôle N, les courants vont de l'avant à l'arrière du plan de la figure; dans les conducteurs qui passent sous un pôle S, les courants vont de l'arrière à l'avant.

5. Connexions des conducteurs entre eux et aux balais.

Dans une machine bipolaire, il existe deux chemins pour aller d'un pôle à l'autre de l'induit; on dit qu'il y a 2 voies d'enroulement (le courant dans un conducteur est I : 2).

Il est possible, dans un induit de machine à $2p$ pôles inducteurs, en choisissant convenablement le nombre de conducteurs et les pas avant et arrière de l'enroulement, de réaliser différents modes de couplage des conducteurs. et d'obtenir :

soit un ***enroulement*** dit ***imbriqué*** ou en ***parallèle***, avec autant de voies d'enroulement que de pôles, soit $2p$; il y a obligatoirement $2p$ balais, les balais de même polarité étant alors reliés ensemble par des connexions extérieures;

soit des ***enroulements ondulés*** qui comprennent :

les ***enroulements série*** [1] à 2 voies d'enroulement, quel que soit le nombre de pôles;

les enroulements ***séries parallèles*** avec un nombre de voies d'enroulement $2p'$. ($2 < 2p' \leqslant 2p$).

Pour les enroulements série, 2 lignes de balais sont suffisantes. Mais on peut aussi maintenir autant de lignes de balais que de pôles

1. Il ne faut pas confondre une dynamo série (dont l'*inducteur* est en série avec l'induit) et une dynamo bobinée série (2 voies d'enroulement dans l'induit). Les deux choses sont indépendantes. Une dynamo série peut être bobinée en série ou en parallèle; inversement une machine bobinée série peut être excitée en shunt, en série, ou en compound.

C'est ce que l'on fait ordinairement, sauf pour les moteurs de tramway.

La f. é. m. de la machine et l'intensité du courant qu'elle peut fournir en marche normale varient avec le mode d'enroulement adopté.

Par exemple, une dynamo à 12 pôles pourra fournir :

120 V et 1 200 A avec 12 voies d'enroulement (enroulement en parallèle);

180 V et 800 A avec 8 voies d'enroulement (enroulement en 4 séries parallèles);

360 V et 400 A avec 4 voies d'enroulement (enroulement en 2 séries parallèles),

720 V et 200 A avec 2 voies d'enroulement (enroulement en série).

6. Notions sur les enroulements multipolaires.

Établir les formules générales fournissant le nombre de conducteurs, les pas avant et arrière pour les différents modes d'enroulements, quel que soit le nombre des pôles de la dynamo, est long et fastidieux. Ces formules n'intéressent que les spécialistes. Il nous suffira de donner quelques exemples simplifiés, surtout dans le cas d'une machine *tétrapolaire*.

Remarquons que, pour que, dans la mise en série, les f. é. m. concordent,

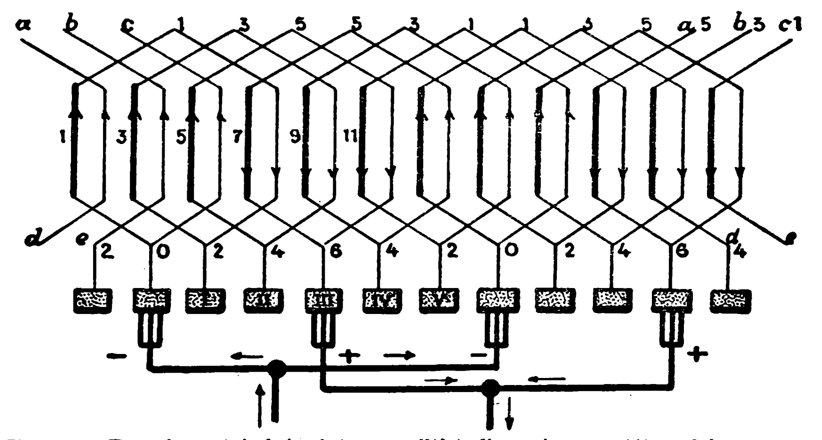


Fig. 3. — Enroulement imbriqué (en parallèle) d'une dynamo tétrapolaire : quatre lignes de balais.

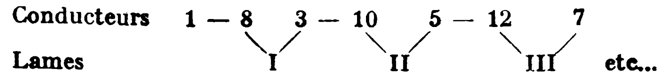
un conducteur situé sous un pôle doit être réuni à un conducteur placé à peu près de la même façon sous un pôle de nom contraire.

1° Enroulement imbriqué, parallèle à 4 voies (fig. 3).

Soit 24 conducteurs, répartis par 2 dans les rainures de l'induit d'une machine à quatre pôles et 12 lames au collecteur.

Traçons le développement de l'induit (voir 7e leçon).

En partant du conducteur 1, le parcours est le suivant :



Supposons que la f. é. m. induite dans chaque conducteur soit 1 volt; partons du conducteur 1 dont nous fixons arbitrairement la tension à 0 du côté du collecteur et suivons l'enroulement.

La tension montera d'une unité chaque fois que nous parcourrons un conducteur dans le sens de la flèche indiquant le sens de la f. é. m.

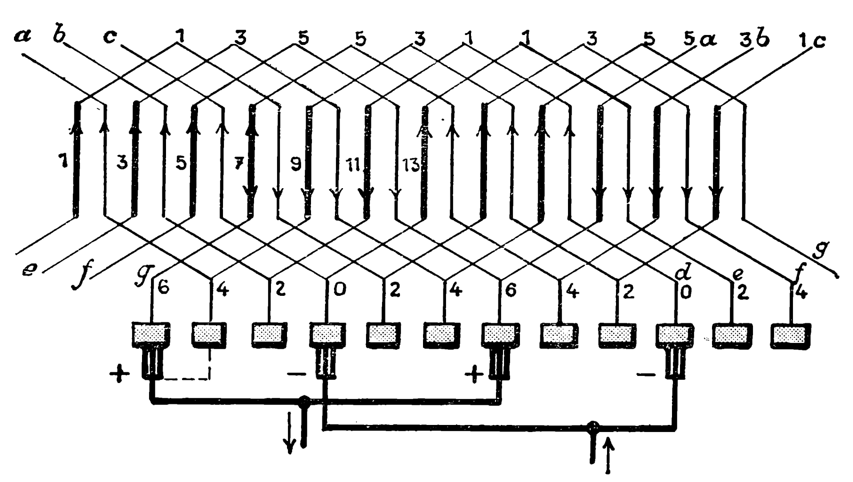


Fig. 4. — **Enroulement ondulé**, à quatre voies, d'une dynamo tétrapolaire : quatre lignes de balais.
On pourrait supprimer un balai de chaque polarité en doublant la largeur de celui qui reste.

et baissera d'une unité chaque fois que nous le parcourrons en sens inverse. Inscrivons les tensions aux points de jonction des conducteurs consécutifs.

Il existe du côté du collecteur deux maximums et deux minimums. Il y aura donc quatre lignes de balais. On réunira ensemble les balais positifs et ensemble les balais négatifs.

L'enroulement est *imbriqué* et c'est un enroulement en *parallèle*.

2° *Enroulement ondulé à 4 voies* (fig. 4).

Soit 24 conducteurs, un pas égal à 7 en avant et en arrière de l'induit. En traçant le développement de l'induit et en déterminant les tensions aux jonctions des conducteurs, on trouve que l'enroulement comporte quatre lignes de balais. C'est un enroulement en parallèle.

3° Enroulement ondulé série (fig. 5).

Avec 26 conducteurs, un pas égal à 7 à l'arrière et à l'avant de l'induit, on obtient du côté du collecteur un maximum et un minimum de tension

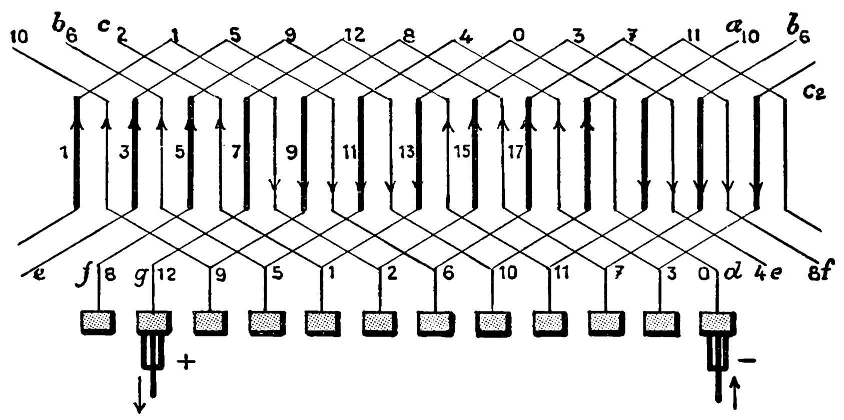


Fig. 5. — Enroulement ondulé série à deux voies d'une dynamo tétrapolaire : deux lignes de balais.

aux jonctions des conducteurs, soit deux lignes de balais. L'enroulement est en série.

4° Enroulement ondulé séries parallèles.

Dans le cas d'une dynamo à six pôles, avec 34 conducteurs, un pas en arrière et avant de 5, on réalisera un enroulement série parallèle avec 4 lignes de balais.

7. Calcul de la f. é. m. d'une dynamo multipolaire.

a) F. é. m. moyenne induite dans un conducteur.

Soit: $2p$ le nombre de pôles de la machine,

N le nombre total de conducteurs de l'induit,

n le nombre de tours de l'induit *par seconde*,

Φ, le flux d'un pôle en *wébers*.

Un conducteur fait un tour avec l'induit en $1/n$ seconde et coupe le flux Φ sous un pôle $2p$ fois par tour, soit un flux total $2p\ \Phi$; la f. é. m. moyenne induite dans ce conducteur est :

$$e = \frac{2p\Phi}{\frac{1}{n}} = 2pn\Phi \text{ volts.}$$

La f. é. m. totale aux balais dépend du nombre de voies d'enroulement

b) F. é. m. dans le cas d'un enroulement en parallèle.

Il y a $2p$ voies d'enroulement. Le nombre de conducteurs dans chaque voie est $\frac{N}{2p}$. La f. é. m. totale est donc :

$$E = \frac{N}{2p} e = nN\Phi \quad \textit{volts}.$$

Elle est la même que si la machine était bipolaire. Si I : 2 est l'intensité du courant dans chaque conducteur, chaque paire de lignes de balais fournit I ampères et la machine pI ampères. Elle se comporte comme p dynamos bipolaires en parallèle.

c) F. é. m. dans le cas d'un enroulement série.

Il y a 2 voies d'enroulement, donc N : 2 conducteurs en série dans chaque voie, la f. é. m. est :

$$E = \frac{N}{2} e = pnN\Phi \quad \textit{volts}.$$

La dynamo correspond à p dynamos bipolaires en série.

d) F. é. m. dans le cas d'un enroulement séries parallèles.

Soit $2a$ le nombre des voies d'enroulements. Il y a $\frac{N}{2a}$ conducteurs en série et la f. é. m. de la machine est :

$$E = \frac{N}{2a} e = \frac{p}{a} n N \Phi \quad \textit{volts}.$$

C'est la formule la plus générale, les deux autres en sont des cas particuliers : si $a = p$, l'enroulement est en *parallèle;* si $a = 1$, l'enroulement est en ***série.***

Remarque. — Dans tous les enroulements, il est nécessaire que les circuits en parallèle aient exactement la même f. é. m. pour éviter des courants de circulation entre circuits. Il faut donc que les pôles soient identiques (c'est pourquoi ils sont le plus souvent rapportés), que les bobines inductrices aient toutes le même nombre de spires, que l'entrefer ait, sous chaque pôle, la même longueur.

8. Fonctionnement en charge et excitation des dynamos multipolaires.

Dans une dynamo multipolaire en charge, tout comme dans une dynamo bipolaire, il se produit des étincelles aux balais et la tension aux bornes de l'induit baisse par l'effet de la chute ohmique dans l'induit et de la réaction d'induit. On décale les balais dans le sens de la rotation de l'induit, ou l'on munit les inducteurs de pôles auxiliaires comme s'il s'agissait d'une machine bipolaire.

L'excitation des inducteurs peut être indépendante, série, shunt ou compound; les propriétés qui en résultent sont celles des machines bipolaires de même excitation.

Exercices.

1. Calculer la f. é. m. d'une dynamo tétrapolaire tournant à 1 200 *t/mn*, chaque pôle produit un flux de 800 000 maxwells, le nombre des conducteurs de l'induit est 500 :

1° quand l'enroulement est imbriqué,

2° quand l'enroulement est ondulé série.

2. Le tambour d'induit d'une dynamo tétrapolaire comporte 31 rainures, et dans chaque rainure, il y a 10 conducteurs. L'enroulement est ondulé série.

Quand la machine tourne à vide à 1 150 *tr/mn*, elle a une f. é. m. de 125 volts.

Quel est le flux d'un pôle ? Quelle est l'induction dans les noyaux qui ont 114 *mm* de longueur et 90 *mm* de largeur? Le coefficient d'utilisation des tôles est 0,90.

3. L'induit d'une machine à 6 pôles est bobiné en parallèle. Il comprend 450 conducteurs en cuivre de 3 *mm* de diamètre, dont la longueur totale, y compris les connexions, est de 300 *m*.

Chercher :

1° le courant débité par la machine si la densité de courant dans l'induit est 3 ampères par mm^2,

2° la résistance de l'induit,

3° le flux par pôle sachant qu'à 720 *tr/mn* la f. é. m. est 120 volts.

4. Pour essayer en charge un moteur à essence, on lui fait entraîner une dynamo shunt. Cette dynamo débite 25 A sous 130 V, sa résistance d'induit est 0,1 Ω, sa résistance d'inducteurs 140 Ω. Une étude antérieure de la génératrice a établi que les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault y sont de 480 watts.

Quelle est la puissance du moteur ?

LECTURE

La machine Gramme.

Les premières dynamos industrielles furent construites, à Paris, en 1871, *par l'électricien Gramme* (fig. 6).

Quelques années après que Faraday eut découvert l'induction en 1832, *des génératrices électriques à induction avaient été inventées, fabriquées et utilisées. Les inducteurs en étaient des aimants ou des électro-aimants. Elles fournissaient du courant alternatif pour l'éclairage des phares par des lampes à arc.*

A cette époque, les deux applications importantes de l'électricité étaient l'éclairage par arc et l'électrolyse. Pour l'électrolyse, du courant continu est indispensable : la machine Gramme en fournit beaucoup plus économiquement que des piles.

La génératrice à courant continu de Gramme était à peine inventée, qu'en 1873, *un ingénieur, H. Fontaine, montra qu'elle était réversible et qu'en lui fournissant du courant, elle fonctionnait comme moteur. Le transport de l'énergie mécanique à distance devenait possible par l'intermédiaire de l'énergie électrique. Le développement de l'électrotechnique moderne commençait*

***

La dynamo Gramme diffère de la dynamo actuelle seulement par l'induit.

La carcasse de l'induit Gramme a d'abord été constituée par une couronne de fil de fer, plus tard par un anneau formé d'un empilement de couronnes de tôle.

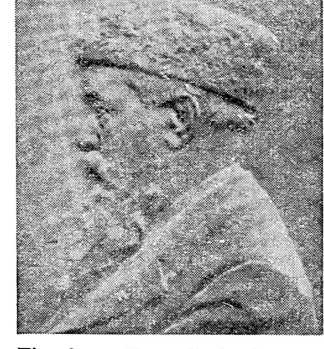


Fig. 6. — Portrait de Gramme (1826-1901).

L'enroulement de l'induit était fait de spires de fil isolé, bobiné autour de l'anneau en passant successivement à l'extérieur et à l'intérieur. Deux sections successives de l'enroulement étaient réunies en série par la soudure de leurs extrémités aux lames du collecteur (fig. 7).

Les propriétés des machines à anneau Gramme étaient identiques à celles des dynamos à induit en tambour que nous avons étudiées. La construction de l'induit en tambour s'est substituée à la construction en anneau, parce qu'elle permet seule la fabrication en série des sections d'enroulement.

***

La vie de Gramme est un exemple étonnant de ténacité et de succès.

Zénobe Gramme, né en 1826 près de Liége en Belgique, fut d'abord ouvrier modeleur. Il n'avait reçu dans son enfance qu'une instruction très rudimentaire : à vingt ans, à peine savait-il lire et écrire.

En 1856, il vint travailler à Paris, pour y trouver un salaire plus élevé qu'à Liége. Il entra comme modeleur dans les ateliers de la société « l'Alliance », qui construisait des génératrices électriques pour le service des phares.

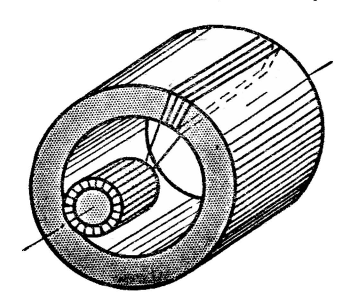


Fig. 7. — Schéma de l'anneau Gramme avec une section de l'enroulement. Le collecteur est représenté, mais l'arbre et le croisillon supportant l'anneau ne sont pas figurés.

Gramme s'intéressa beaucoup aux machines qu'il aidait à fabriquer. Pour en comprendre le fonctionnement, il entreprit d'étudier l'électricité dans un ouvrage de physique à l'usage des élèves des lycées. Tâche ardue pour lui qui devait s'aider d'un dictionnaire pour saisir le sens des mots ! Il ne se rebuta pas. Bientôt il commença des recherches expérimentales.

Pour s'y adonner tout entier, il abandonna sa profession de modeleur et, vivant de peu, consacra tout son temps à des essais dans sa cuisine transformée en atelier et en laboratoire.

En 1867, il fit breveter une machine à courant alternatif, en 1869, une machine à courant continu.

En 1870, un capitaliste créait avec lui la « Société des machines magnéto-électriques Gramme ». La première dynamo sortait de son usine en 1871 et était présentée à l'Académie des sciences.

***

Gramme a-t-il été l'inventeur de la dynamo?

Les travaux scientifiques de Faraday, Ampère, Œrsted, Arago, Ohm, Joule *et d'autres savants, en établissant les lois de l'électricité, avaient préparé l'invention.*

Vers 1860, *un physicien italien,* Paccinotti, *imaginait l'anneau et le collecteur. Quelques années plus tard, un Français,* de Romilly, *construisait un dispositif analogue. Gramme inventa à nouveau anneau et collecteur et surtout, en quelques années, réalisa des génératrices utilisables. Il est considéré, à juste titre, comme le promoteur d'un mouvement industriel si considérable que, seul, peut lui être comparé celui que provoqua l'invention de la machine à vapeur.*

3. — MOTEURS A COURANT CONTINU

12e LEÇON

Moteur à excitation indépendante fonctionnant à vide.

1. Les dynamos sont réversibles : elles peuvent servir de moteurs.

Expériences. *a*) — La polarité des bornes de l'induit et des induc-

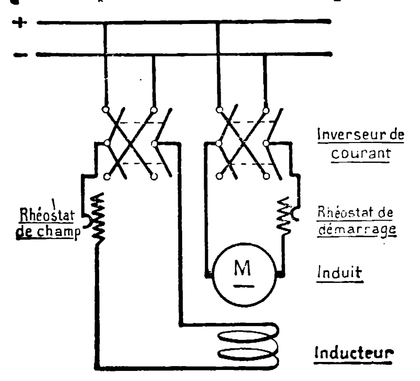


Fig. 1. — Montage d'un moteur à excitation indépendante pour une étude expérimentale. Des inverseurs et des rhéostats sont montés sur les circuits de l'induit et des inducteurs.

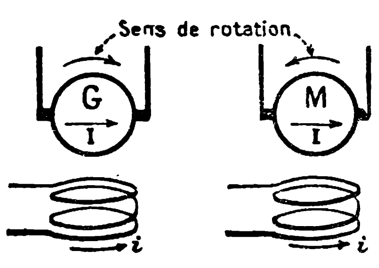


Fig. 2. — A gauche la dynamo fonctionne comme génératrice.
A droite elle fonctionne comme moteur.
Le sens des courants dans l'induit est le même. Le sens des courants dans l'inducteur est aussi le même.
Les sens de rotations sont inverses.

teurs de la dynamo étudiée dans les leçons précédentes a été repérée

pour un sens de rotation déterminé quand la machine fonctionne en génératrice.

b) Installons cette dynamo suivant le schéma de la figure 1 pour que les courants fournis par la ligne passent, dans l'inducteur et dans l'induit,dans les sens repérés quand la machine tourne en génératrice.

Un rhéostat *(rhéostat de démarrage)* est mis en série avec l'induit, un rhéostat de champ en série avec les inducteurs.

c) Envoyons du courant dans les inducteurs, puis fermons l'interrupteur de l'induit :

l'induit tourne;

il tourne en sens inverse de sa rotation quand la machine est génératrice (fig. 2).

Donc : ***une dynamo peut fonctionner ou comme génératrice ou comme moteur.***

2. On peut changer le sens de rotation d'un moteur.

Inversons le sens du courant dans les inducteurs seulement : *le sens de rotation est changé.*

Inversons le sens du courant dans l'induit seulement : *le sens de rotation est changé.*

Inversons le sens du courant à la fois dans les inducteurs et dans l'induit : *le sens de rotation de la machine ne change pas.*

Donc : ***le sens de rotation du moteur dépend du sens du courant dans les inducteurs et dans l'induit : si le courant a le même sens dans l'induit et dans les inducteurs quand la machine fonctionne en génératrice ou en moteur, les sens de rotation sont inverses.***

3. Comment on peut régler la vitesse de rotation d'un moteur.

a) Avec le rhéostat de champ, diminuons l'intensité du courant dans les inducteurs : *la vitesse du moteur augmente.* Augmentons le courant d'excitation : *la vitesse du moteur diminue.*

La vitesse varie donc en sens inverse du flux.

b) Sans modifier le courant inducteur, augmentons la résistance du rhéostat en série avec l'induit; nous diminuons ainsi la tension aux bornes de l'induit : *la vitesse du moteur diminue.* Augmentons cette tension en diminuant la résistance : *la vitesse du moteur croît.*

La vitesse d'un moteur à excitation indépendante varie donc dans le même sens que la tension aux bornes de l'induit.

Concluons par un conseil pratique de grande importance :

tant que l'induit d'un moteur est sous tension, il faut éviter de trop diminuer et surtout de couper le courant inducteur; le

moteur risque de s'emballer et l'induit de se disloquer sous l'effet de la force centrifuge.

4. Théorie de la réversibilité de la dynamo.

a) La figure 3 représente schématiquement les inducteurs et les conducteurs de l'induit d'un moteur bipolaire. Le courant I amené aux bornes de l'induit se partage entre les deux moitiés de l'enroulement couplées en parallèle et une intensité I : 2 traverse chaque conducteur dans le sens indiqué sur la figure.

Considérons l'un quelconque de ces conducteurs, A par exemple. Il se trouve dans le champ magnétique créé par l'inducteur : il est donc soumis à une force électromagnétique. La règle des trois doigts (main droite) indique le sens de cette force.

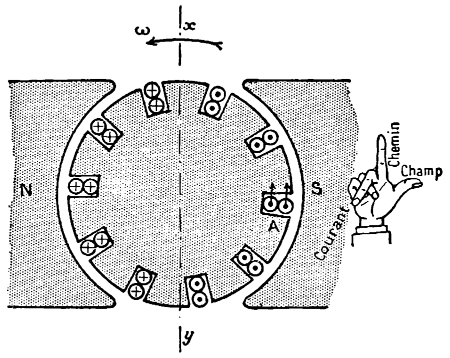


Fig. 3. — Schéma de l'induit d'un moteur bipolaire.
A droite, position de la main pour le conducteur A ; la force électromagnétique *f* qui agit sur lui tend à le déplacer vers le haut, donc à faire tourner l'induit dans le sens de la flèche.

Toutes les forces électromagnétiques, qui agissent sur les conducteurs de l'induit, tendent à faire tourner cet induit dans le sens de la flèche ω; *l'induit est donc entraîné dans ce sens.*

Si le sens du flux est inversé, ou si le sens du courant dans tous les conducteurs est changé, la rotation se produit en sens inverse.

b) Vous savez que la force électromagnétique appliquée à un conducteur parcouru par un courant I et qui se déplace en coupant normalement un flux Φ produit un travail

$$W = I \cdot \Phi \cdot \textit{joules}.$$

Soit un moteur bipolaire dans lequel le flux sous un pôle est Φ; l'induit porte *N conducteurs* et tourne à *n tours par seconde.* Si le courant total absorbé par l'induit est I, chaque conducteur est parcouru par un courant I : 2. Chaque conducteur coupe deux fois le flux Φ par tour de l'induit (une fois sous le pôle *nord*, une fois sous le pôle *sud*), il produit donc un travail.

$$2\Phi \times \frac{I}{2} = I.\Phi \textit{ joules;}$$

les ***N conducteurs*** fournissent :

$$N \cdot I \cdot \Phi. \textit{ joules}$$

et en 1 seconde, pour *n* tours, ils produisent :

$$P = n \;.\; N \;.\; \Phi \;.\; I$$

watts tr/s conducteurs wébers ampères

c'est la puissance du moteur.

5. Une force contre-électromotrice est engendrée dans l'induit quand le moteur tourne.

Expériences. — Installons un voltmètre *polarisé* aux bornes du moteur (fig. 4, 1), et mettons ce moteur en marche.

Le voltmètre mesure la tension 115 volts. De plus, comme il est polarisé, il nous permet de repérer la borne +, et par suite de connaître le sens du courant dans l'induit : nous l'indiquons sur le schéma (fig. 4, 1).

Coupons le courant dans l'induit seulement (fig. 4, 2). Le moteur continue à tourner, mais il ralentit peu à peu.

Le voltmètre dévie toujours, dans le même sens; mais la tension qu'il indique baisse progressivement : il marquait encore 114 volts, par exemple, immédiatement après l'ouverture de l'interrupteur; l'aiguille revient vers le zéro qu'elle atteint quand le moteur s'arrête.

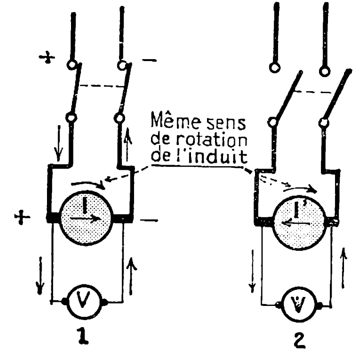


Fig. 4. — Grâce au voltmètre, on voit à droite la *force contre-électromotrice* engendrée dans l'induit quand il tourne.

Les flèches indiquent le sens des courants dans l'induit et le voltmètre.

Remarquons que le courant inducteur, et, par suite, le champ inducteur, sont restés invariables pendant ces expériences.

L'indication du voltmètre prouve que la rotation de l'induit dans ce champ engendre une force électromotrice. Cela se comprend : la machine se trouve exactement dans les mêmes conditions qu'une génératrice à excitation indépendante, fonctionnant à vide.

D'autre part, puisque la déviation du voltmètre n'a pas changé de sens, c'est que le sens du courant dans cet appareil n'a pas varié. Indiquons-le sur le schéma (fig. 4, 2). Nous en déduisons le sens du courant I', qui traverse l'induit; il est *opposé* au sens du courant I absorbé par l'induit quand la dynamo fonctionne comme moteur.

Ainsi, la f. é. m. engendrée dans l'induit, quand le moteur tourne, tend à faire circuler dans cet induit un courant de sens contraire au sens du courant absorbé : elle s'oppose donc au passage de ce dernier; c'est pourquoi on l'appelle ***force contre-électromotrice du moteur*** (f. c. é. m.).

6. La valeur de la force contre-électromotrice E′ est donnée par la même formule que la force électromotrice d'une génératrice.

Car c'est le même phénomène d'induction électromagnétique qui produit la f. c. é. m. du moteur et la f. é. m. de la même machine fonctionnant en génératrice.

La f. c. é. m. a donc pour valeur

$$E' = nN\Phi \text{ volts}$$

n désignant le nombre de tours par seconde;
N — le nombre de conducteurs portés par l'induit;
Φ — le flux, en *wébers* émanant d'un pôle de l'inducteur

Insistons sur ce fait que la ***f. c. é. m. est proportionnelle à la vitesse de l'induit.***

7. Le courant absorbé par l'induit est considérablement réduit grâce à la force contre-électromotrice.

Soit : U la tension du réseau; R la résistance de l'induit (nous l'avons mesurée : 0,9 ohm pour notre moteur);

Si le moteur ne tournait pas, le courant dans l'induit serait :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Par exemple, avec U = 115 volts, R = 0,9 *ohm*, on aurait :

$$I = \frac{115}{0,9} = 128 \text{ ampères.}$$

Or, mesurons le courant absorbé quand la machine tourne à vide : nous trouvons seulement 1,2 *ampère*.

C'est qu'alors la f. c. é. m. s'oppose au passage du courant; on a :

$$I = \frac{U - E'}{R}. \qquad (1)$$

Les mesures faites nous permettent de calculer E′. Nous avons, en effet :

$$I = 1,2, \qquad U = 115, \qquad R = 0,9.$$

Donc,

$$1,2 = \frac{115 - E'}{0,9}$$

d'où :

$$E' = 115 - 1,2 \times 0,9 \simeq 113,9 \text{ volts.}$$

A vide, la f. c. é. m. est presque égale à la tension aux bornes.

8. Un rhéostat de démarrage est indispensable.

Si nous appliquions directement la tension du réseau aux bornes du *moteur arrêté*, le courant serait si intense (128 *ampères* dans le cas de notre installation) que l'*induit grillerait :* la machine serait détruite.

Il est donc indispensable, pour faire démarrer le moteur sans le dété-

riorer par suite d'une intensité excessive, de *mettre un rhéostat en série avec l'induit.* A la fermeture du circuit, alors que l'induit est arrêté et n'engendre pas de f. c. é. m., le courant se trouve réduit à une valeur admissible, par exemple, le double de l'intensité à pleine charge.

On met graduellement les résistances de ce rhéostat hors circuit à mesure que la vitesse de l'induit croît et que la f. c. é. m. augmente.

Le démarrage terminé, la tension U du réseau est appliquée aux bornes de l'induit, et l'on a :

$$I = \frac{U - E'}{R} \qquad \text{ou} \qquad U = E' + RI \qquad (1)$$

REMARQUE. — Insistons sur la nécessité de *manœuvrer lentement* la manette du rhéostat de démarrage, afin de donner le temps au moteur de prendre sa vitesse normale.

Ne pas traiter un rhéostat de démarrage comme un simple interrupteur.

9. La puissance mécanique du moteur est P = E'I watts.

Nous avons démontré :

1° que $P = nN\Phi I$ *watts.*

2° que $E' = nN\Phi$ *volts.*

Donc :

$$\underset{\text{watts}}{P} = \underset{\text{volts}}{E'} \times \underset{\text{ampères.}}{I}$$

10. Remarque sur l'étude précédente.

Dans l'étude de la *dynamo génératrice*, nous avons porté notre attention sur la ***force électromotrice*** dont l'induit est le siège.

Dans l'étude de la *dynamo motrice*, nous avons porté d'abord notre attention sur les ***forces électromagnétiques*** qui agissent sur les conducteurs de l'induit.

Mais, en réalité, quel que soit le mode de fonctionnement de la machine, les deux phénomènes se produisent simultanément.

Dans une dynamo en rotation, il existe toujours :

1° ***une f. é. m.***, qui produit le courant dans le circuit extérieur quand la machine est génératrice, qui s'oppose à la tension extérieure quand la machine est motrice;

2° ***des forces électromagnétiques*** appliquées aux conducteurs de l'induit. Ces forces produisent un travail moteur que l'on utilise quand la machine est motrice, un travail résistant qui exige que la dynamo soit entraînée par un moteur quand elle est génératrice.

Exercices.

1. Calculer la résistance du rhéostat de démarrage d'un moteur de 15 *ch*, 440 *volts*, dont le rendement est 0,80, sachant que l'on admet au démarrage une intensité égale à 1,5 fois l'intensité normale.

2. La résistance d'induit d'une dynamo est 0,9 Ω.
Fonctionnant en génératrice, à 1 600 *tr/mn*, la machine fournit 18 A et la tension à ses bornes est 114 volts. Quelle est sa f. é. m.?
On la fait fonctionner en moteur à vide sans modifier son excitation en appliquant 114 volts à ses bornes. Elle absorbe 1,2 A. Quelle est sa f. c. é. m.? Quelle est sa vitesse? On néglige la réaction d'induit.

3. Une dynamo génératrice à excitation séparée tourne à la vitesse de 1 500 *tr/mn* et produit en circuit ouvert une f. é. m. de 150 *V* quand l'intensité du courant dans les inducteurs est i_0. On diminue de moitié le courant inducteur et l'on constate que pour obtenir encore une f. é. m. de 150 *V*, il faut que la dynamo tourne à la vitesse de 2 300 *t/mn*.
1° Calculer le rapport des flux inducteurs dans les deux cas.
2° La même machine excitée avec le courant primitif i_0 est alimentée sous 220 *V* et tourne à la vitesse de 1 500 *tr/mn*. Quelle est sa résistance d'induit, sachant que le courant qui circule dans l'induit est 90 A?

4. Une dynamo à excitation indépendante charge une batterie d'accumulateurs comprenant 55 éléments de 2 *V*, mis en série. La résistance totale de cette batterie est $r = 0{,}1\ \Omega$ et sa capacité est 100 *A-h*. La f. é. m. de la dynamo est $E = 120$ *V* et la résistance de son induit $r' = 0{,}4\ \Omega$.
Quelle est l'intensité du courant de charge et le temps nécessaire pour charger complètement la batterie?
La dynamo précédente fonctionne maintenant comme moteur; elle est alimentée par la batterie précédente. L'excitation de son inducteur est la même que précédemment, mais son induit tourne à une vitesse qui est les deux tiers de la vitesse dans le fonctionnement en génératrice.
Quelle est l'intensité du courant débité et la durée de décharge de la batterie?
On néglige la résistance des connexions entre la dynamo et la batterie.

Moteur à excitation indépendante fonctionnant en charge.

1. Expériences.

Le moteur entraîne une génératrice qui débite dans un rhéostat (fig. 1). En faisant varier le débit de la génératrice, la charge du moteur, c'est-à-dire le travail qu'il doit fournir pour entraîner la génératrice, varie dans le même sens.

a) Un ampèremètre en série avec l'induit montre que l'intensité absorbée, faible quand le moteur tourne à vide, croît avec la charge.

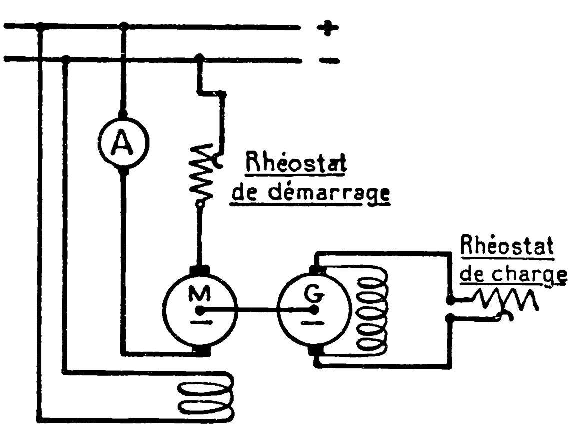


Fig. 1. — Schéma de montage d'un moteur à excitation séparée entraînant une génératrice shunt.

b) La vitesse du moteur diminue quand la charge augmente : de 1 600 *tr/mn* à vide, elle diminue à 1 250 *tr/mn* quand le moteur absorbe 14 A.

c) Les balais étant calés sur la ligne neutre de l'induit, des étincelles se produisent aux balais quand le moteur est chargé [1]. On supprime ces étincelles en déplaçant les balais en sens contraire du mouvement de rotation de l'induit.

2. Expliquons les faits constatés.

a) Quand la puissance mécanique fournie par le moteur croît, la puis-

1. Ces étincelles sont peu importantes avec des machines de construction moderne.

sance électrique qu'il absorbe augmente. Or, cette puissance est fournie par le réseau à *tension constante*, donc l'intensité absorbée augmente.

b) La tension U aux bornes de l'induit, la f. c. é. m. E′ et la chute ohmique RI dans l'induit sont liées par la relation

$$E' = U - RI.$$

U est constant; donc la f. c. é. m. diminue quand l'intensité dans l'induit augmente.

Mais, d'autre part :

$$E' = n\,N\,\Phi$$

N, nombre de conducteurs de l'induit, est constant; Φ est constant quand l'excitation est constante (nous négligeons la réaction magnétique d'induit); donc si E′ diminue, *n*, vitesse de rotation, diminue proportionnellement.

Le courant qui circule dans les conducteurs de l'induit du moteur tend à aimanter la carcasse de l'induit. Il se produit une *distorsion* et *une diminution du flux utile* tout comme dans une génératrice. *C'est la réaction magnétique de l'induit* qui tend à accélérer le moteur en diminuant Φ (12e Leçon, § 3).

Cet effet est contraire à celui de la chute ohmique. Dans les moteurs tels qu'on les construit, l'effet de la chute ohmique est prépondérant : le moteur ralentit quand on le charge, ainsi que nous l'avons constaté expérimentalement, mais il ralentit moins que ne l'indique la formule d'Ohm.

c) Dans une section de l'induit qui passe sous les balais, le courant change de sens. Il s'y produit donc une f. é. m. de commutation, cause des étincelles.

Comparons la commutation dans le moteur à la commutation dans la génératrice.

D'après le montage réalisé, le sens du courant dans l'induit est le même dans les deux cas; mais le sens de rotation étant différent, la *f. é. m. de commutation du moteur est de sens contraire à la f. é. m. de commutation de la génératrice.*

Pour la compenser, on placera les balais du moteur dans la position même qu'ils occupaient, la machine fonctionnant en génératrice; en effet, le sens de rotation étant inversé, la f. é. m. due aux flux sera de sens contraire à ce qu'elle était, donc opposée encore à la f. é. m. de commutation.

Compte tenu du sens de rotation, les balais seront ainsi *en arrière* de la ligne neutre au lieu d'être en avant.

L'emploi très général de *pôles auxiliaires* permet de laisser les balais sur la ligne théorique de commutation quelle que soit la charge.

3. Équations générales de fonctionnement d'un moteur.

Les cinq formules qui suivent résument les propriétés du moteur bipolaire à exitation séparée quand on néglige la réaction d'induit.

1° *Force contre-électromotrice.*

$$E' = n \cdot N \cdot \Phi \text{ volts.} \qquad (1)$$

2° *Tension aux bornes de l'induit.*

$$U = E' + RI \text{ volts.} \qquad (2)$$

R est la résistance de l'induit, I le courant qu'il absorbe.

3° *Puissance électrique transformée en puissance mécanique :*

$$P = E'I. \qquad (3)$$

4° *Vitesse de l'induit.*

En remplaçant dans la formule (2) E' par sa valeur donnée par la formule (1) :

$$U = n.N.\Phi + RI.$$

D'où :

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi} \text{ tr/s.} \qquad (4)$$

5° ***Moment du couple moteur.***

a) Un couple de moment M *mètres-newtons* qui tourne d'un angle θ évalué en *radians* effectue un travail

$$W = M\theta \text{ joules;}$$

pour un tour ($\theta = 2\pi$ *radians*) :

$$W = 2\pi \ M \text{ joules.}$$

Si le couple tourne de *n tours par seconde*, son travail en une seconde ou puissance est :

$$P = 2\pi n \, M \text{ watts.}$$

b) La puissance d'un moteur à excitation séparée, absorbant I ampère dans l'induit est :

$$P = E'I \text{ watts.}$$

Donc :

$$2\pi n M = n.N.\Phi.I.$$

D'où :

$$M = \frac{N}{2\pi}\Phi.I \text{ mètres-newtons.}$$

Soit en représentant par k l'expression $\frac{N}{2\pi}$ dans laquelle tous les fac-

teurs sont constants :

$$M = k.\Phi.I. \qquad (5)$$

Remarque. — Les formules (1), (2), (3), (4), (5), sont valables : 1° *quel que soit le mode d'excitation du moteur*, c'est-à-dire le mode de production du flux Φ;

2° *pour les moteurs multipolaires*; mais alors il faut tenir compte du nombre de pôles $2p$ et du nombre de voies d'enroulement $2a$ dans les expressions de E' et de M :

$$E' = \frac{p}{a} \cdot n \cdot N \cdot \Phi \cdot \qquad (1')$$

$$M = \frac{p}{a} \cdot k \cdot \Phi \cdot I. \qquad (5')$$

4. Emploi des moteurs à excitation indépendante.

Nous avons étudié longuement un moteur monté à excitation séparée, parce que l'indépendance relative de l'induit et de l'inducteur y rend les phénomènes plus simples.

Mais ce mode de montage est très peu utilisé dans la pratique industrielle, parce qu'il exige deux sources différentes de courant. On n'y recourt que dans les cas où l'on désire par-dessus tout un fonctionnement sûr et précis.

Par exemple, dans les mines la montée et la descente des cages dans les puits doivent s'effectuer dans les meilleures conditions de sécurité, surtout quand les cages sont chargées de mineurs. C'est un moteur à excitation indépendante qui commande le tambour d'enroulement du câble supportant les cages. Le courant d'excitation est maintenu constant. Du sens de la tension que l'on applique aux bornes de l'induit, dépend le *sens de rotation* du moteur. La valeur de cette tension détermine la *vitesse de la rotation*[1].

Exercices.

1. Calculer le moment du couple à pleine charge d'un moteur de 10 *ch* tournant à 1 320 *t/mn*.

2. Un moteur de 3 *ch* tournant à 1 600 *tr/mn* porte une poulie dont le diamètre est 150 *mm*. Quelle est la force de traction que le moteur exerce sur le brin moteur de sa courroie? (On supposera que l'autre brin a une tension négligeable.)

3. L'induit d'un moteur bipolaire comporte 672 conducteurs. La résistance de l'induit entre balais est 0,9 Ω. On alimente le moteur à 115 volts à excitation indépendante. Quand l'intensité absorbée est 14 A, la vitesse du moteur est 1 530 *tr/mn*.

1° Calculer, en négligeant la réaction d'induit, le flux dans les inducteurs.

2° Calculer la vitesse du moteur quand il absorbe 7 A.

3° Au démarrage, l'intensité du courant est 28 A. Quel est le couple de démarrage?

1. Voir 29e Leçon, paragraphe 2.

Moteur excité en dérivation à tension constante.

1. Examinez un rhéostat de démarrage pour moteur shunt et dessinez son schéma.

Il comporte (fig. 1) un petit nombre de *plots* (6, par ex.), avec des *résistances* de fil assez gros pour supporter l'intensité de démarrage. La manette est munie d'un *ressort spiral* logé autour de l'axe qui tend à la ramener sur le plot mort.

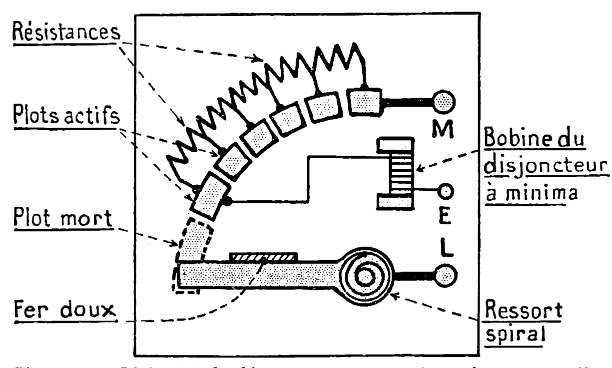


Fig. 1. — Rhéostat de démarrage pour moteur shunt avec disjoncteur à minima d'excitation.
Le ressort tend à ramener la manette sur le plot mort.

Un ***disjoncteur à minima*** consistant en un petit électro-aimant est traversé par le courant d'excitation du moteur. Il maintient, par attraction magnétique, la manette dans sa position après démarrage, malgré l'action antagoniste du ressort de rappel. Si le courant d'excitation ou le courant dans la ligne d'alimentation viennent à être coupés, l'électro cesse d'être aimanté, abandonne son armature et la manette revient au plot mort, position de départ.

L'appareil porte trois bornes marquées L *(ligne)*, E *(excitation)*, M *(moteur)*.

b) Sur certains démarreurs (fig. 2), se trouve en plus un ***disjoncteur à maxima***. C'est un électro-aimant dont la bobine est faite de quelques spires de gros fil, traversé par le courant total d'alimentation du moteur. Si l'intensité devient trop grande, l'armature est attirée et court-circuite la bobine à minima, provoquant ainsi le déclanchement de la manette et son retour au plot mort.

2. Apprenez à monter correctement un moteur shunt.

Nous effectuons le câblage du moteur suivant le schéma de la figure 3 [1]. Remarquez que le conducteur 1 qui va directement de l'interrupteur au moteur, est relié à une borne de l'induit et à une borne de l'inducteur.

Fig. 2. — Rhéostat pour moteur shunt avec disjoncteurs à maxima et minima.

Remarquez en outre :

1° que la tension totale U du réseau est appliquée aux bornes du *circuit inducteur* dès que la manette passe sur le premier plot actif ;

2° qu'en fin de démarrage, les résistances du rhéostat se trouvent insérées dans le circuit d'excitation. Cette disposition est sans inconvénient parce que la résistance du rhéostat est faible par rapport à celle des bobines inductrices ;

3° que les bobines de l'inducteur forment toujours un circuit fermé avec les résistances du rhéostat et l'induit. Quand on ouvre l'interrupteur bipolaire, pour arrêter le moteur, la f. é. m. de self des bobines inductrices produit un courant dans ce circuit fermé et n'atteint pas une

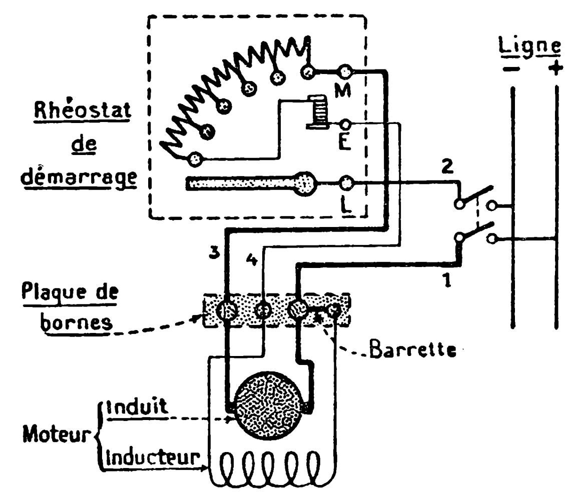


Fig. 3. — Montage d'un moteur shunt. Le monteur-électricien a simplement à mettre en place 4 fils (1, 2, 3, 4).

1. Un moteur shunt est analogue à un moteur à exitation indépendante. Sa particularité est d'avoir la même tension aux bornes des inducteurs et aux bornes de l'induit.

valeur dangereuse pour l'isolement de l'inducteur. Le montage est dit *anti-inductif*.

3. Comment on inverse le sens de rotation d'un moteur shunt.

a) Repérons le sens de rotation du moteur.
Changeons, *avant* le rhéostat de démarrage, le sens du courant d'alimentation : le sens de rotation reste le même.

Le sens de rotation d'un moteur shunt est indépendant du sens du courant d'alimentation.

En effet, le changement de sens du courant venant du réseau produit à la fois l'inversion du courant dans l'induit et l'inversion du courant dans les inducteurs. Nous avons vu (12e leçon) que, dans ces conditions, le sens de rotation du moteur reste le même.

b) Pour inverser le sens de rotation d'un moteur shunt, il faut renverser le sens du courant, soit seulement dans l'induit, soit seulement dans les inducteurs.

Avec le montage suivant le schéma figure 4, le sens de rotation est contraire à celui que donne le montage figure 3.

Avec le rhéostat de la figure 5, on peut faire tourner le moteur dans un sens ou dans l'autre.

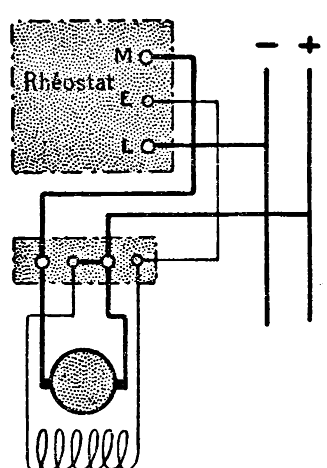


Fig. 4. — ***Montage d'un moteur shunt.*** Le sens de rotation est différent de celui que donne le montage figure 3. Dites pourquoi?
Il a suffi de déplacer à la plaque de bornes la barrette et la connexion du fil qui vient de la borne E du rhéostat.

4. La vitesse d'un moteur shunt est pratiquement constante quelle que soit sa charge.

a) La machine shunt qui nous a servi de type d'étude dans plusieurs leçons précédentes est alimentée, en moteur, à tension constante. Elle entraîne une génératrice débitant dans un rhéostat. (Voir la figure 1 de la 13e leçon.)

Mesurons la vitesse du moteur correspondant à des intensités croissantes du courant absorbé.

Nous trouvons pour U = 115 volts

Intensité	2	4	6	10	13	15	*Ampères*
Vitesse	1 620	1 614	1 600	1 566	1 540	1 522	*tours par minute*

De la marche à vide à la marche à pleine charge, la vitesse diminue d'environ 6 %. Cette variation de vitesse est moindre encore pour des moteurs shunt plus puissants. **Elle est pratiquement peu importante.**

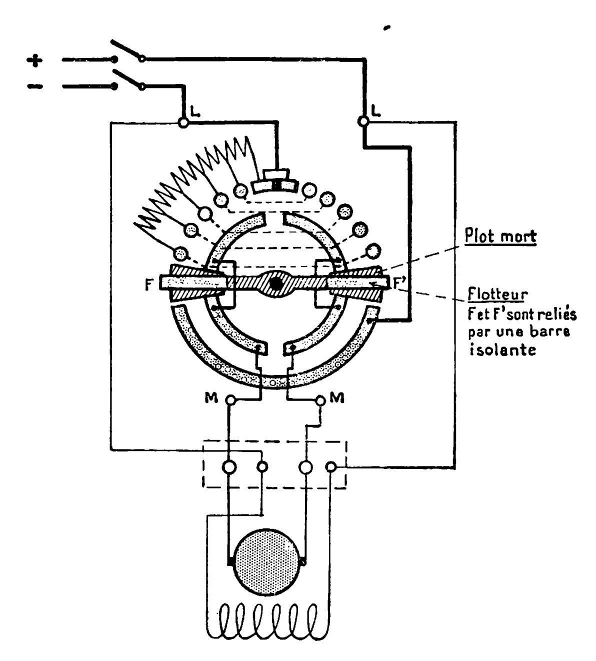


Fig. 5. — Démarreur pour moteur shunt. Le moteur tourne dans un sens ou dans l'autre suivant le sens de déplacement des frotteurs F et F' du rhéostat. Dites pourquoi.

Les traits en pointillés dans le démarreur représentent des conducteurs reliant les plots, deux à deux.

Donc : ***la vitesse d'un moteur shunt est presque constante quand la charge du moteur varie.***

***b*) Cette propriété s'explique à l'aide de l'équation de la vitesse d'un moteur à courant continu établie dans la 13e leçon :**

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi} \qquad (1)$$

On peut écrire cette formule :

$$n = \left(\frac{U}{N\Phi} - \frac{RI}{N\Phi}\right)$$

U, N et Φ sont constants, seul I varie. Le premier terme de la valeur de n est donc constant.

Le second varie proportionnellement à I, mais sa valeur est faible par rapport au premier terme, parce que la résistance d'induit R est petite. Il en résulte que n diminue quand I croît, mais diminue peu.

La diminution est plus faible encore que ne l'indique la formule à cause de la réaction magnétique d'induit qui diminue légèrement Φ.

5. Pour faire varier la vitesse d'un moteur shunt, on utilise un rhéostat de champ.

Pour ajuster la vitesse du moteur à une valeur précise on modifie le flux inducteur Φ à l'aide d'un *rhéostat de champ.*

Il est possible d'accélérer ainsi de 20 à 25 % la vitesse d'un moteur shunt de construction normale.

Quand la valeur du flux Φ devient très faible, en cas de rupture du circuit inducteur, par exemple, deux phénomènes se produisent simultanément :

1° la vitesse du moteur s'accélère et devient très grande, la formule (1) explique ce fait;

2° l'intensité absorbée par l'induit augmente beaucoup. En effet :

$$I = \frac{U - E'}{R} \qquad \text{et} \qquad E' = nN\Phi\, 10$$

la f. c. é. m. E' est très faible si le flux est faible et I tend vers U : R.

Si le courant d'alimentation n'est pas coupé immédiatement, la force centrifuge due à la vitesse exagérée disloque l'induit. *C'est pour prévenir cet accident qu'un moteur shunt doit être protégé par un **disjoncteur à minima** d'excitation et par un **disjoncteur à maxima** ou des fusibles sur le circuit principal.*

6. Le couple d'un moteur shunt est pratiquement proportionnel au courant I qui traverse l'induit.

Il a été démontré (13e leçon) que le moment du couple d'un moteur à courant continu est :

$$M = k\,\Phi\, I.$$

Quand le moteur shunt fonctionne à tension constante, le flux inducteur Φ est presque constant; le moment du couple est donc proportionnel à I, courant qui traverse l'induit.

7. Conclusion : courbes caractéristiques d'un moteur shunt et emplois de ce type de moteur.

Le fonctionnement d'un moteur est caractérisé par sa vitesse n et son couple M. Or, ces deux grandeurs varient seulement en fonction de l'intensité absorbée, dans le cas habituel où le moteur est alimenté à tension constante.

Les propriétés pratiques d'un moteur se traduisent donc par trois courbes : 1° celle de la vitesse en fonction de l'intensité absorbée, $n = f$ (I) :

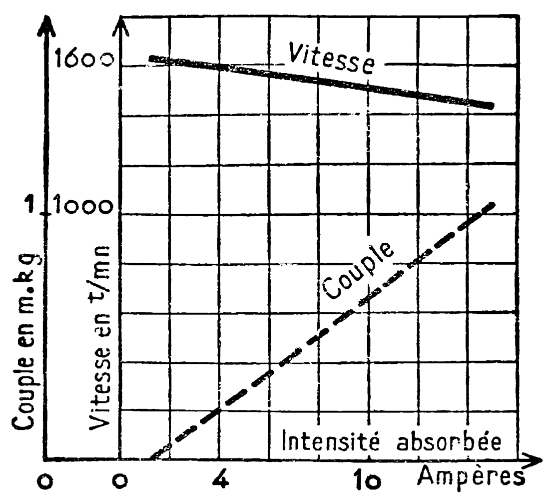


Fig. 6. — Caractéristiques électromécaniques d'un moteur shunt.

2° celle du couple en fonction de la même intensité, M = F (I); on donne à ces courbes le nom de *caractéristiques électromécaniques;*

3° celle du couple en fonction de la vitesse, M = f' (n), qui se nomme *caractéristique mécanique.*

La figure 6 représente les caractéristiques électromécaniques du petit moteur shunt que nous avons étudié; la figure 7, la caractéristique mécanique. On remarquera que ces courbes sont sensiblement des droites, comme l'indique la théorie.

La propriété essentielle du moteur shunt est donc de posséder une ***vitesse pratiquement constante*** et, de plus, ajustable à une valeur précise.

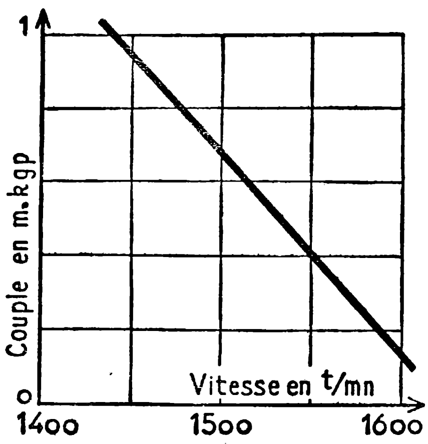


Fig. 7. — Caractéristique mécanique d'un moteur shunt.

C'est pourquoi le moteur shunt est le plus employé des moteurs à courant continu. Il sert surtout à la *commande des machines-outils.*

Exercices.

1. **Un moteur shunt est branché selon le schéma de la figure 8 où les inducteurs sont en dérivation aux bornes de l'induit et le rhéostat de démarrage en série avec l'ensemble de l'induit et des inducteurs.**

Le moteur ne démarre pas quand la manette du rhéostat est amenée sur les premiers plots. Si l'on continue à déplacer la manette, ou bien les fusibles du circuit d'alimentation fondent, ou bien le moteur, s'il est à vide, démarre brusquement et prend sa vitesse normale.

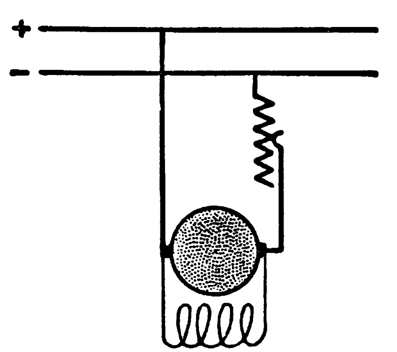


Fig. 8. — **Montage défectueux d'un moteur shunt (exercice 1).**

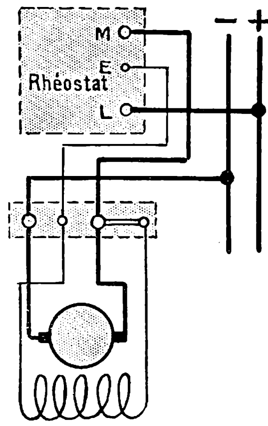


Fig. 9. — Autre montage défectueux d'un moteur shunt (exercice 2).

1° Expliquer ces faits.

2° Corriger le schéma défectueux.

2. **Le rhéostat de démarrage d'un moteur shunt est relié à la plaque de bornes du moteur suivant le schéma de la figure 9.**

Le moteur ne démarre pas et, si l'on insiste, les fusibles fondent.

Expliquer ces faits.

3. **Un moteur shunt bipolaire de 5 *ch*, à 110 volts, tourne à 1 200 *tr/mn* à charge normale.**

La résistance de l'induit entre balais est 0,1 Ω, celle des inducteurs 65 Ω, le rendement du moteur est 0,80.

Calculer

1° le courant total, le courant dans les inducteurs, le courant dans l'induit pour la charge normale.

2° le moment du couple à pleine charge

4. Un tour parallèle est commandé par un moteur shunt à 115 volts dont la résistance d'induit entre balais est 0,2 Ω et la résistance des inducteurs 65 Ω. Le rendement du moteur, à toutes charges, est 0,7.

Quand le tour est entraîné à vide, la vitesse de sa broche est 200 *tr/mn* et l'intensité totale absorbée par le moteur est 3 ampères.

Quand le tour travaille, le moteur prend au réseau 8 ampères.

Calculer la vitesse du tour en négligeant la réaction magnétique d'induit. (On détermine la f. c. é. m. du moteur dans les deux cas. La vitesse du moteur, et par suite celle du tour, est proportionnelle à la f. c. é. m.)

5. Faire le schéma d'une génératrice shunt chargeant une batterie d'accumulateurs. Indiquer les sens des courants sur ce schéma.

La génératrice est entraînée par un moteur à essence. Expliquer ce qui se produit, si on ferme l'arrivée des gaz. Comment fonctionne alors la machine? Indiquer le sens des courants sur un nouveau schéma.

On ouvre à nouveau le papillon d'admission des gaz. Que se passe-t-il?

6. Un moteur shunt est alimenté sous tension constante de 115 V. Sa résistance d'induit est 0,5 Ω. Quand il fournit un certain couple, l'induit absorbe 20 ampères et tourne à 900 *tr/mn*.

Quelle est à peu près la vitesse du moteur quand on lui demande un couple double et que l'induit absorbe 40 A?

7. Un moteur shunt absorbe 5*A* sous 224 *V* en tournant à 1 700 *tr/mn*. La résistance de l'induit est 1,05 Ω et celle du circuit inducteur 305 Ω. Déterminer :

1° le courant dans les inducteurs et le courant dans l'induit;

2° la f. c. é. m. du moteur (on négligera la réaction magnétique de l'induit peu importante dans les moteurs);

3° la f. é. m. que donnerait la dynamo fonctionnant en génératrice à excitation indépendante à 1 600 *tr/mn* avec le courant d'excitation qui a été déterminé;

4° est-il possible, en alimentant successivement le moteur shunt à vide à des tensions différentes U, d'obtenir les valeurs nécessaires pour tracer une partie de la caractéristique à vide de la machine à 1 600 *t/mn*? Indiquer les mesures à effectuer. Quels sont les avantages et les inconvénients de ce procédé?

8. Un moteur shunt absorbe à vide 8 *A* sous 115 *V*, sa résistance d'induit est 0,1 Ω.

Le réseau de distribution qui l'alimente normalement à 115 *V*, subit des variations brusques de tension de ± 2 *V*. Ces variations sont très rapides et pendant les périodes de croissance ou de décroissance de la tension, à cause de l'inertie de l'induit, la vitesse et la f. c. é. m. du moteur conservent les valeurs qu'elles ont à l'instant où commence la variation de tension.

Comment varie le courant absorbé?

Moteur à excitation en série et moteur à excitation composée

A. MOTEUR A EXCITATION EN SÉRIE

1. Montage d'un moteur série.

N. B. — ***Il est imprudent de faire fonctionner, à vide, un moteur série à sa tension normale,*** à moins qu'il ne soit tout petit.

Expériences. — Montons en moteur (fig. 1) la dynamo série qui nous a servi à étudier les propriétés de la génératrice série (10e leçon) en lui faisant entraîner une génératrice débitant dans un rhéostat. Le moteur est alimenté par le réseau à 220 volts, un rhéostat de démarrage et un inverseur bipolaire sont placés dans le circuit.

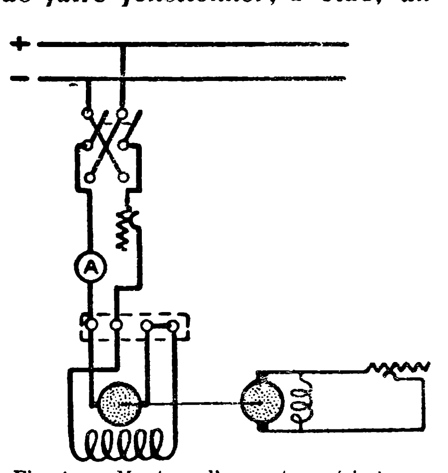


Fig. 1. — Montage d'un moteur série à gauche. A droite, dynamo génératrice permettant de charger le moteur.

2. Sens de rotation.

Expériences. — *a*) Repérons le sens de rotation de la machine pour le montage effectué.

Renversons le sens du courant d'alimentation : *le sens de rotation n'est pas changé.*

C'est que nous avons inversé le sens du courant à la fois dans l'induit et dans les inducteurs.

b) Pour inverser le sens de rotation, il faut changer le sens du courant soit seulement dans l'induit, soit seulement dans les inducteurs.

La figure 2 indique la modification à faire à la plaque de bornes du moteur pour qu'il tourne en sens contraire.

La figure 3 est le schéma d'un démarreur qui permet de faire tourner un moteur série à volonté dans un sens ou dans l'autre.

3. Vitesse du moteur série.

Expériences. — *a*) Faisons varier la charge du moteur en modifiant la résistance du rhéostat dans lequel débite la génératrice et mesurons la vitesse correspondant à différentes valeurs de l'intensité absorbée par le moteur.

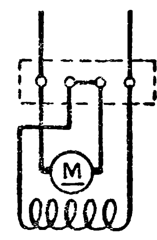


Fig. 2. — Changement des connexions à la plaque de bornes du moteur de la figure 1 pour inverser le sens de rotation : la barrette a fait demi-tour, et un seul fil de ligne a été déplacé.
Les connexions de la plaque avec le moteur ne sont pas touchées.

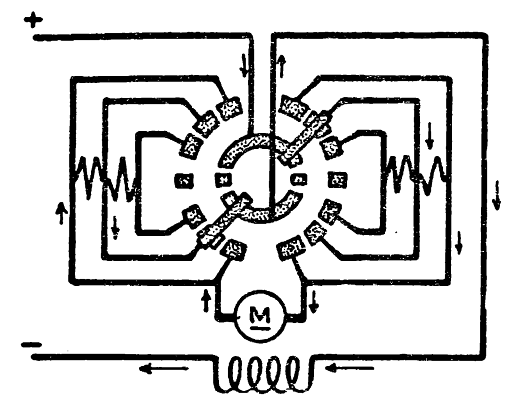


Fig. 3. — Rhéostat pour moteur série tournant à volonté dans un sens ou dans l'autre

Nous trouvons, la tension aux bornes étant 220 volts :

Intensité	12,5	13	15	16	17,5	19	A
Vitesse	1 600	1 550	1 400	1 350	1 290	1 240	*tr/mn.*

Donc : ***la vitesse d'un moteur série diminue beaucoup quand la charge augmente.***

b) On sait que la vitesse d'un moteur à courant continu est donnée, en tours par seconde, par la formule :

$$n = \left(\frac{U}{N\Phi} - \frac{RI}{N\Phi}\right) \quad (1)$$

Dans le cas d'un moteur série :

1° R représente la résistance totale de l'induit et des inducteurs qui sont en série;

2° Si le circuit magnétique n'est pas saturé, on peut admettre que Φ est proportionnel au courant I dans les inducteurs et poser

$$\Phi = kI$$

L'expression (1) devient :

$$n = \left(\frac{U}{NkI} - \frac{R}{Nk}\right)$$

La seule variable est I; les autres grandeurs sont constantes et même le terme $\frac{R}{Nk}$ est négligeable.

Donc, la vitesse est à peu près inversement proportionnelle à I. En la représentant par une courbe avec les valeurs de I en abscisses, on obtient une branche d'hyperbole dont l'axe des ordonnées est une asymptote.

La vitesse d'un moteur série est très grande à vide. En d'autres termes : ***un moteur série s'emballe à vide.***

C'est pourquoi il est dangereux de le faire fonctionner dans ces conditions : il est alors freiné seulement par les frottements (paliers, balais, ventilation), et sa vitesse devient excessive.

c) On peut aussi s'expliquer cette propriété du moteur série en remarquant que si l'intensité dans l'induit est faible, la f. c. é. m. que doit produire le moteur est voisine de U; or le flux produit par les inducteurs est faible, il faut donc que l'induit tourne très vite pour donner la f. c. é. m. nécessaire.

d) On peut régler la vitesse d'un moteur série :

1° on la diminue dans le cas de faibles charges en insérant des résistances dans le circuit d'alimentation; on réduit ainsi la tension aux bornes de l'induit, donc sa vitesse;

2° on l'augmente dans le cas de fortes charges en shuntant les inducteurs par une résistance variable; on diminue ainsi le courant dans les bobines inductrices, on réduit le flux et la vitesse croît.

4. Couple d'un moteur série.

Le moment du couple d'un moteur à courant continu est

$$M = k \Phi I$$

Dans le cas d'un moteur série où le circuit magnétique *n'est pas saturé*, Φ est proportionnel à I, donc :

$$M = k'I^2.$$

Le moment du couple est alors proportionnel au carré de l'intensité absorbée.

Si l'on démarre le moteur avec une intensité double de l'intensité normale, le moment du couple au démarrage serait quadruple de celui qui

correspond à la pleine charge si le moteur n'était pas saturé. En réalité, le circuit magnétique est déjà partiellement saturé à l'intensité normale. On obtient dans ces conditions, pour une intensité double de l'intensité normale, un couple supérieur au couple normal, mais très inférieur au quadruple : 2,5 fois par exemple.

On dit que ***le moteur série donne un coup de collier au démarrage.***

Fig. 4.
Caractéristiques électromécaniques d'un moteur série.

5. Caractéristiques et emploi des moteurs série.

Les caractéristiques électromécaniques de la figure 4 sont celles du petit moteur série que nous venons d'employer, ainsi que la caractéristique mécanique de la figure 5. Elles expriment graphiquement les propriétés établies au cours de la leçon.

En résumé, les moteurs série sont des moteurs : qui s'emballent à vide; dont la vitesse diminue beaucoup quand la charge augmente; qui donnent un coup de collier au démarrage.

Ils conviennent dans les applications où le couple résistant augmente avec la vitesse et où ils sont constamment en prise avec les appareils à entraîner (ventilateurs, pompes centrifuges noyées, tramways, tracteurs, automobiles électriques, cabestans, etc.). On les emploie aussi pour actionner les appareils de levage (grues et palans électriques, ponts roulants)[1].

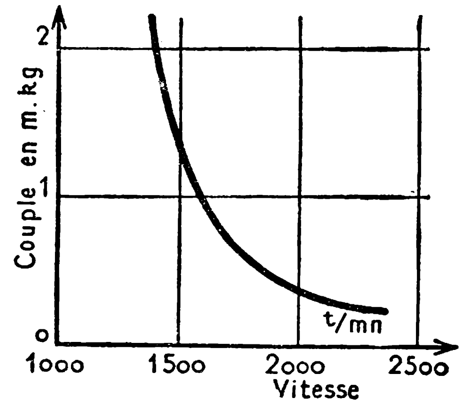


Fig. 5. — Caractéristique mécanique d'un moteur série.

1. On équipe les ascenseurs avec des moteurs shunt pour obtenir une vitesse constante plus agréable aux usagers.

B. MOTEUR COMPOUND

6. Le compoundage des inducteurs s'effectue de deux façons

Les enroulements shunt et série sont habituellement disposés de manière à produire un flux de même sens, leurs ampères-tours s'ajoutent : le compoundage est dit ***additionnel.***

On peut aussi choisir le sens du courant dans l'enroulement série pour que ses ampères-tours se retranchent de ceux de l'enroulement shunt, le compoundage est dit ***différentiel.***

7. Propriétés du moteur à compoundage additionnel.

Ces propriétés sont intermédiaires entre celles du moteur shunt et celles du moteur série, plus ou moins voisines des unes ou des autres suivant l'importance relative des deux enroulements. A vide ou à faible charge, le moteur compound se comporte comme un moteur shunt, l'influence de l'enroulement série ne devient sensible que lorsque la charge croît :

a) le moteur ne s'emballe pas à vide comme un moteur série : et sa vitesse diminue plus que celle d'un moteur shunt quand la charge augmente;

b) le couple moteur est plus grand que pour un moteur shunt en charge et surtout pendant la période de démarrage.

On emploie le compoundage additionnel :

pour les petits moteurs à démarrage direct, sans rhéostat;

pour les moteurs ayant à fournir un couple très variable avec la vitesse (ventilateurs, pompes);

pour les moteurs entraînant des machines à grande inertie (machines de laminoir, munies de lourds volants) de façon à diminuer l'appel de courant dans l'induit, lorsque le couple résistant varie beaucoup, mais de façon temporaire.

8. Propriétés du moteur à compoundage différentiel.

L'enroulement série ne comprend alors que peu de spires. Son rôle est de diminuer, quand le moteur est chargé, le flux produit par l'enroulement shunt et d'empêcher ainsi la diminution de la vitesse. On réalise par ce compoundage des moteurs à vitesse pratiquement constante de la marche à vide à la marche à pleine charge.

Si l'on donnait à l'enroulement série une importance trop grande, dans le cas de grandes intensités absorbées, soit lors d'un démarrage brusque, soit en cas de surcharge, le sens de rotation du moteur s'inverserait.

9. Conclusion.

Les courbes des vitesses et des couples en fonction du courant absorbé pour les moteurs shunt, série et compound (additionnel) rapprochées dans la figure 6 résument les propriétés des moteurs à courant continu.

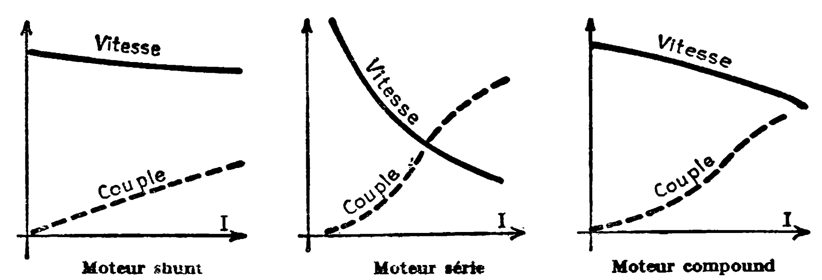


Fig. 6. — Courbes des moments des couples et courbes des vitesses en fonction des intensités absorbées pour les moteurs shunt, série et compound.

On retiendra que ce sont des machines souples, dont l'emploi s'impose de préférence aux moteurs à courant alternatif quand il s'agit de problèmes délicats de commande électrique.

Exercices.

1. Un atelier est équipé de ventilateurs, de meules émeri, de raboteuses, d'étaux-limeurs, de fraiseuses, de perceuses, de tours, de rectifieuses, etc. Ces machines sont commandées individuellement par des moteurs à courant continu. Indiquer le mode d'excitation du moteur convenant à chaque type de machine.

2. La f. é. m. d'une batterie d'accumulateurs de 60 éléments est 132 volts en fin de charge et 110 volts en fin de décharge. Pour charger cette batterie, on se sert d'une génératrice compound à compoundage différentiel. Le rhéostat de champ en série avec l'enroulement shunt est réglé pour que la machine à vide donne 132 volts. On la branche alors sur la batterie à charger. La charge est *auto-régulatrice*. Comment, et pourquoi?

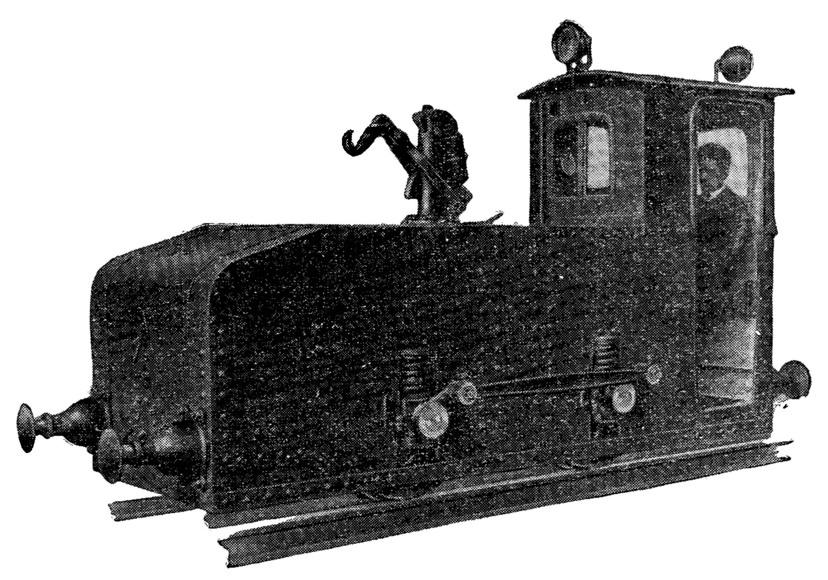
3. Un tour parallèle est commandé par un moteur série, à 115 volts, dont la résistance d'induit est 0,6 Ω et la résistance des inducteurs 0,4 Ω. Le rendement du moteur est 0,75.

Quand le tour est entraîné à vide, le moteur prend 4 A au réseau. Quand le tour débite, sa vitesse est 200 *tr/mn* et le moteur absorbe 9 A.

Calculer la vitesse du tour à vide en admettant que le flux dans le moteur est proportionnel au courant inducteur. (On déterminera la f. c. é. m. du moteur dans les deux cas, cette f. c. é. m. est proportionnelle à la vitesse et à l'intensité du courant dans les inducteurs.)

Étude d'un tracteur électrique.

Les emplois de l'énergie électrique à la traction sont importants et très variés. Des lignes de chemins de fer, de plus en plus nombreuses, sont exploitées avec des locomotives électriques alimentées parfois par



Cliché de la Société des Forges et Ateliers de Constructions électriques de Jeumont (Nord).

Fig. 1. — **Tracteur** de **halage** des **péniches sur les canaux.**
Remarquez que, dans le type représenté, les **essieux sont rendus solidaires** par **une bielle.**

du courant alternatif. Le Métropolitain, à Paris, est alimenté par du courant continu de 500 à 600 volts. Des tracteurs électriques, qui sont des

locomotives de taille et de puissance réduites, servent dans les mines et dans les grandes usines aux manutentions intérieures et à la manœuvre des wagons. On les emploie à la traction des bateaux sur les canaux à grand trafic des régions industrielles. Des camions, équipés d'une batterie d'accumulateurs, effectuent des transports à courte distance. Les chariots à bagages, dans les grandes gares de chemins de fer, sont traînés par de petits tracteurs à accumulateurs.

Nous nous proposons d'étudier à titre d'exemple un tracteur électrique de bateaux (fig. 1).

1. Travail effectué par un tracteur de bateaux.

Une péniche chargée de 300 tonnes, hâlée à une vitesse de 4 à 5 kilomètres à l'heure dans un canal où l'eau qu'il lui faut déplacer offre une résistance considérable par suite du resserrement des rives, exige un tracteur muni d'un moteur d'une vingtaine de chevaux-vapeur.

La mise en vitesse normale du bateau à partir de l'arrêt est lente : le démarrage dure plusieurs minutes. On utilise un moteur série dont le couple est grand au démarrage.

L'effort exercé sur le câble de remorque doit être au moins équilibré par l'adhérence des roues du tracteur aux rails sur lesquels elles se déplacent. Cette adhérence est due au frottement. Si f est le coefficient de frottement de glissement de l'acier du bandage des roues sur l'acier des rails, P le poids porté par les roues, la force d'adhérence aux rails est :

$$F = P \times f.$$

C'est la limite supérieure de l'effort de traction. Si cet effort dépassait F, les roues patineraient. Or, le coefficient f varie entre 0,10 et 0,20. Pour que l'effort de traction puisse atteindre plusieurs centaines de kilogrammes, il faut que le tracteur soit très lourd : il pèse de 8 à 10 tonnes. Pour que tout le poids du tracteur contribue à l'adhérence, les quatre roues de l'appareil sont motrices : les deux essieux qui les entraînent sont rendus solidaires par des engrenages et une chaîne à rouleaux, ou par des bielles.

Il n'y a pas de plaques tournantes sur les voies de halage et le tracteur doit pouvoir se déplacer indifféremment dans les deux sens.

Enfin parce que la machine est souvent manœuvrée brutalement, sa construction, celle de son moteur, celle de l'appareillage de commande, doit être très robuste.

2. Le moteur de traction.

Un moteur série construit spécialement pour la traction possède quatre pôles. Il est muni de pôles auxiliaires (il peut tourner dans les deux sens sans déplacement des balais).

La carcasse en est blindée pour protéger les enroulements.

Cette carcasse, en acier coulé, est en forme de prisme carré à angles abattus; elle est en deux parties réunies suivant un plan diamétral horizontal; la moitié supérieure s'enlève, après déboulonnage, pour que la visite et le nettoyage de l'induit soient faciles (fig. 2).

Le moteur du tracteur que nous étudions est un moteur à 500 volts; il

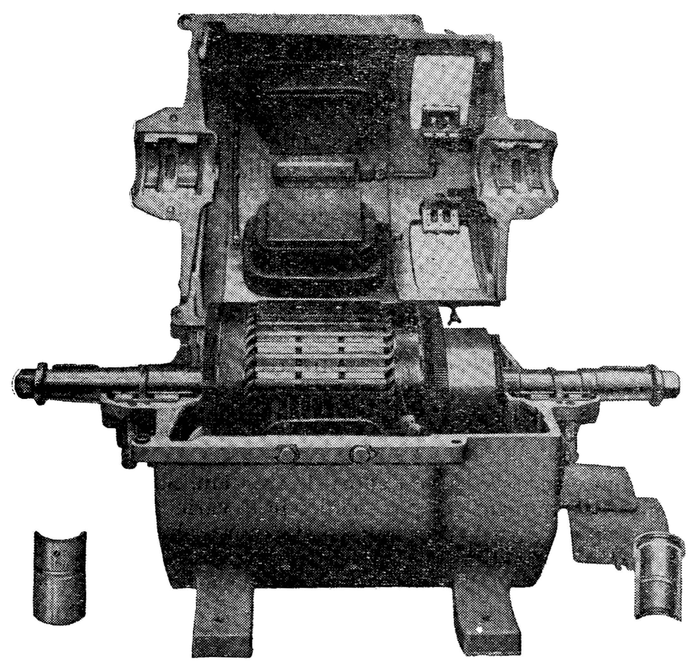


Fig. 2. — Moteur série de traction.
L'inducteur, qui forme cuirasse, s'ouvre pour faciliter le nettoyage.
Remarquer les pôles auxiliaires et les deux lignes de balais.
Le courant est amené par fil aérien et trolley (perche conductrice avec roulette en contact avec le fil).

absorbe 50 ampères et il tourne à environ 500 tours par minute à pleine charge. La résistance de l'induit entre bornes est 0,4 ohm, celle des inducteurs 0,5 ohm.

Les essais du moteur ont donné les résultats suivants :

Intensité absorbée, I	67	58	50	41	32	A
Vitesse, *n*	485	515	540	610	660	*tr/mn*
Rendement[1], η	0,78	0,81	0,82	0,82	0,81	

3. Un train d'engrenages réduit la vitesse des roues motrices

Le moteur tourne beaucoup plus vite que les roues du tracteur. La réduction de la vitesse est faite par un double train d'engrenages. Un pignon de 17 dents est claveté sur l'arbre du moteur. Il engrène avec une roue dentée de 46 dents solidaire d'un pignon de 12 dents qui commande un engrenage de 64 dents claveté sur l'essieu. Le diamètre des roues motrices est 0,70 mètre (fig. 3).

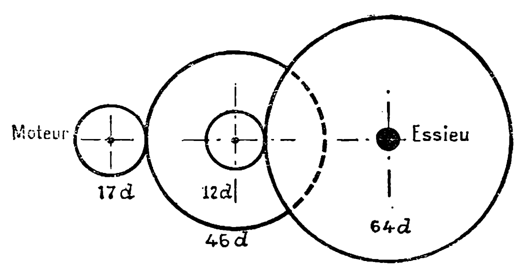


Fig. 3. — Train d'engrenages réducteur de vitesse.

Calculons la vitesse en kilomètres/heure du tracteur correspondant aux différentes intensités absorbées par le moteur.

Le train d'engrenages réduit la vitesse de rotation des roues motrices à :

1. Le rendement d'un moteur de traction ne se mesure habituellement pas par la méthode des pertes séparées. Deux moteurs identiques sont accouplés mécaniquement. On fait fonctionner l'un comme moteur et l'autre comme génératrice. On mesure la puissance électrique P_f fournie au premier et la puissance électrique P_u restituée par le second. Soit η le rendement que l'on admet être le même pour les deux machines. En désignant par P la puissance mécanique produite par le moteur et fournie par lui à la génératrice, on a :

$$\eta = \frac{P}{P_f} \qquad \eta = \frac{P_u}{P}$$

soit en multipliant les deux expressions membre à membre :

$$\eta^2 = \frac{P_u}{P_f}.$$

$$\frac{17 \times 12}{46 \times 64} = 0{,}069$$

de celle de l'arbre du moteur.

La circonférence d'une roue motrice mesure :

$$\pi \times 0{,}70 = 2{,}20 \text{ mètres.}$$

La vitesse en kilomètres/heure est donc :

$$v = \frac{2{,}20 \times n \times 0{,}069 \times 60}{1\,000} = \frac{n \times 9{,}15}{1\,000}.$$

On obtient ainsi :

Intensité absorbée I	65	58	50	41	32	A
Valeur de n	485	515	540	610	660	*tr/mn*
Vitesse du tracteur, v	4,450	4,700	4,950	5,550	6,050	*km/h*

4. Calculons l'effort de traction aux différentes vitesses.

Désignons cet effort par F *kgf*. Si *l* est, en mètres, le chemin parcouru en une seconde, la puissance à la jante des roues du tracteur est

P = F × *l kilogrammètres par seconde.*

soit, *v* étant la vitesse en kilomètres/heure :

$$P = \frac{F \times v \times 1\,000}{3\,600} = \frac{Fv}{3{,}6} \, kgm/s. \qquad (1)$$

Cherchons une autre expression de cette puissance en partant de la puissance UI watts fournie au moteur.

Le rendement du moteur est η[1], la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur est UIη watts.

La commande par engrenages comporte une perte d'énergie notable. Le rendement d'un couple d'engrenages de fabrication ordinaire est 0,80, soit 0,64 pour un double train. Il y a perte encore par la chaîne de transmission reliant les deux essieux. Finalement la puissance à la jante des roues est UIη × 0,60 watts, soit :

$$P = \frac{UI\eta \times 0{,}60}{9{,}81} \, kgm/s. \qquad (2)$$

En égalant les deux valeurs de P (1) et (2) :

$$F = \frac{UI\eta}{v} \times 0{,}22.$$

1. La lettre grecque η se prononce : *éta :* il est recommandé de l'employer comme symbole du *rendement.*

En effectuant les calculs, on trouve pour U = 500 volts.

I	67	58	50	41	32	A
η	0,78	0,81	0,82	0,82	0,81	
v	4,450	4,700	4,950	5,550	6,050	*km/h*
F	1 290	1 120	910	670	470	*kgf*

Sur la figure 4 sont tracées les courbes du rendement du moteur, de la vitesse du tracteur et de l'effort de traction en fonction de l'intensité absorbée.

5. Résistances de démarrage et de réglage.

Ces résistances sont constituées par des grilles en fonte capables de supporter, en régime permanent, une intensité d'une soixantaine d'ampères. Leur résistance totale est d'environ 9 ohms.

Puisque la résistance totale de l'induit et des inducteurs en série est 0,9 ohm, l'intensité au démarrage atteint :

$$I = \frac{500}{9,9} = 50 \text{ A environ.}$$

Le démarrage s'effectue à intensité normale.

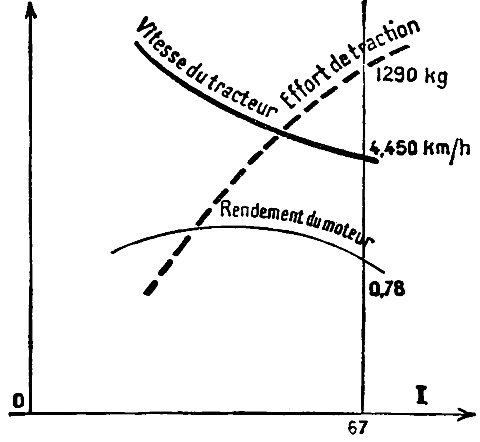
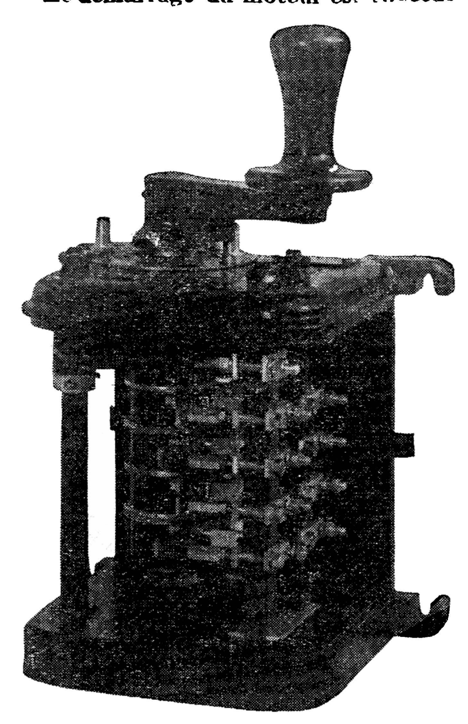


Fig. 4. — Courbe du *rendement* du moteur, de la *vitesse* du tracteur, de l'*effort de traction* en fonction de l'intensité absorbée.
(La courbe du rendement représente η diminué de 0,50.)

6. Contrôleur ou combinateur.

Le courant est amené de la centrale électrique par un fil aérien. Il est pris sur ce fil et conduit au moteur par une perche conductrice munie d'une roulette de contact avec le fil nommée *trolley*. Après passage dans le moteur, le courant est renvoyé à la centrale par les rails de la voie ou par un deuxième fil aérien avec trolley.

Le démarrage du moteur est effectué par le wattman au moyen d'un *combinateur* ou *contrôleur* beaucoup plus robuste qu'un rhéostat à plots du modèle ordinaire (fig. 5).



Cliché Alsthom.

Fig. 5. — *Contrôleur* représenté ouvert.

Un contrôleur se compose essentiellement d'un arbre que l'on peut faire tourner autour de son axe vertical. Cet arbre porte des secteurs en cuivre, isolés, s'appuyant, quand l'arbre tourne, sur des frottoirs métalliques disposés en ligne parallèlement à l'axe de rotation.

Si l'on suppose déroulée la surface cylindrique de tous les secteurs, l'ensemble présente l'aspect du schéma de la figure 6. Lorsque le wattman tourne la manette de l'axe du contrôleur, le cylindre des secteurs se présente successivement sous les frottoirs suivant les sept génératrices représentées en pointillé et numérotées. Dans la position 0, le courant est coupé et le moteur est à l'arrêt. Le moteur démarre, toutes résistances en circuit, à la position 1; les résistances de réglage sont éliminées l'une après l'autre quand on passe aux positions 2, 3, 4, etc.

Un autre petit contrôleur permet l'inversion du sens de marche.

Parfois le contrôleur comporte un shuntage des inducteurs pour accroître la vitesse lors du retour haut-le-pied du tracteur.

7. Des voitures électriques sont équipées avec deux moteurs.

Le réglage du moteur par l'insertion de résistances en série dans son circuit produit une perte d'énergie en chaleur Joule.

Dans les tramways, les gros tracteurs, les gros camions électriques, on emploie de préférence deux moteurs dont le couplage permet d'économiser l'énergie.

Au démarrage, les deux moteurs sont montés en série avec leurs résistances de démarrage R_1 et R_2, résistances plus faibles que dans le cas d'un seul moteur puisque chaque moteur n'utilise que la moitié de la tension d'alimentation. Pour obtenir une vitesse plus grande, on supprime d'abord les résistances en circuit. Ensuite on couple les deux moteurs en parallèle avec leurs résistances en série. Enfin on supprime ces résistances : les deux moteurs sont en parallèle, chacun d'eux sous la tension totale du réseau (fig. 7), c'est la marche à pleine puissance. Ces différentes combinaisons sont réalisées par la manœuvre du contrôleur.

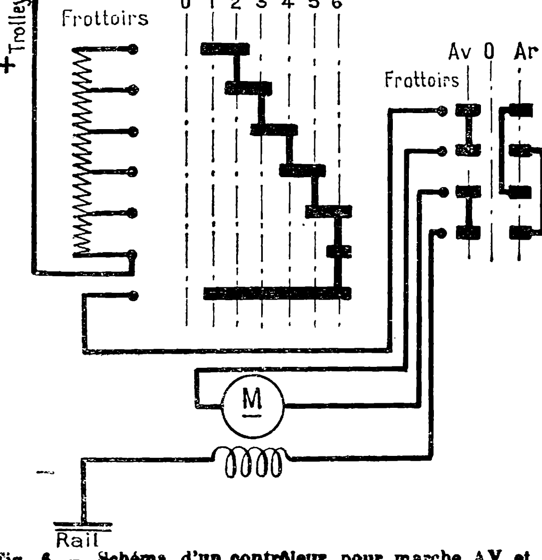


Fig. 6. — Schéma d'un contrôleur pour marche AV et AR.

Les tramways électriques sont en général équipés avec deux moteurs de 25 chevaux.

Les camions électriques de 5 tonnes sont munis de deux moteurs de 6 chevaux et d'une batterie d'accumulateurs de 44 éléments de 390 à 550 ampères-heures. Ils peuvent parcourir de 35 à 50 kilomètres sans recharge.

Les voitures motrices du Métropolitain de Paris possèdent des moteurs de 175 chevaux. Il y a deux ou trois voitures motrices par rame. Les manœuvres de démarrage et de réglage sont com-

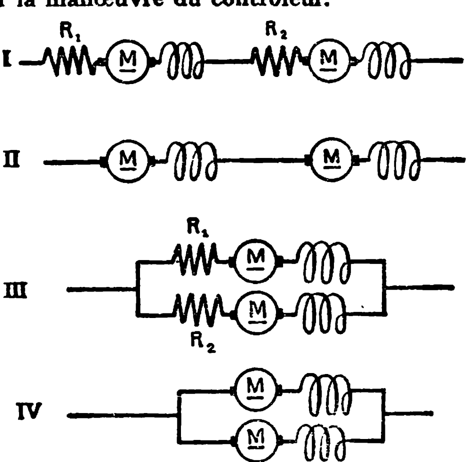


Fig. 7. — Les quatre régimes de marche d'un tracteur à deux moteurs.

mandées par contacteurs et un seul wattman suffit pour une rame. Le démarrage ne dure qu'une vingtaine de secondes, le train a pris alors sa vitesse normale d'environ 20 kilomètres à l'heure.

Exercices.

1. Un moteur du Métropolitain absorbe 250 ampères sous 550 volts. Son rendement est 0,89. Il tourne alors à 450 *tr/mn*. Le diamètre des roues des voitures est 850 *mm*. Ces roues sont commandées par un pignon de 22 dents sur l'arbre du moteur engrenant avec une roue dentée de 65 dents calée sur l'essieu moteur. Le rendement du couple d'engrenages est 0,80.

Calculer :

1° la vitesse de la voiture en *km/h;*

2° l'effort de traction exercé par la voiture.

2. Combien coûte l'énergie électrique consommée pour la traction d'une voiture de tramway, démarrage effectué, en terrain plat, sur une distance de 1 kilomètre?

La voiture est équipée de deux moteurs de 25 chevaux chacun, de rendement 0,80 En palier, à pleine puissance, la vitesse est de 25 *km/h*. L'énergie électrique coûte 5,60 francs le kilowatt-heure.

3. Une voiture de tramway est équipée de deux moteurs série pouvant absorber en service continu 50 *A* sous 500 *V*. La résistance d'induit de chaque moteur est 0,40 Ω, celle des inducteurs 0,50 Ω.A chaque moteur peut être ajoutée une résistance de démarrage de 2,5 Ω.

Calculer la puissance totale obtenue dans les quatre régimes de marche schématisés dans la figure 7 de la page 111, quand chaque moteur absorbe 50 *A*. On prendra pour la valeur de la puissance d'un moteur le produit de l'intensité absorbée par la f. c. é. m.

4. Il s'agit de commander un palan à vis sans fin de 2 000 *kg* par un moteur séri. de 2 *ch* dont la vitesse à pleine charge est 600 *tr/mn*.

La vis sans fin produit une réduction de vitesse de 1/60. La roue à empreintes sur laquelle engrène la chaîne calibrée de levage a un diamètre primitif de 275 *mm*. Le rendement du palan est évalué à 0,55.

1° Étudier s'il est possible de manchonner directement le moteur en bout de la vis sans fin;

2° Si une réduction complémentaire de vitesse par pignon sur le moteur et roue dentée sur la vis sans fin est nécessaire, calculer le rapport des nombres de dents des deux engrenages à employer;

4° Déterminer, en *m/mn*, la vitesse de levée d'une charge de 2 000 *kg*.

Mesure du rendement d'une dynamo. Méthode des pertes séparées.

1. Définition du rendement d'une génératrice ou d'un moteur.

a) Une dynamo génératrice transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Elle reçoit sur son arbre une puissance mécanique P_f; elle fournit au circuit sur lequel elle débite une puissance électrique utile P_u.

Son rendement est le rapport entre la puissance produite et la puissance qui lui a été fournie :

$$\eta = \frac{\text{Puissance électrique utile}}{\text{Puissance mécanique fournie}} = \frac{P_u}{P_f}.$$

b) Un moteur électrique effectue la transformation inverse : il reçoit du réseau une puissance électrique P_f, il produit une puissance mécanique utilisable à sa poulie P_u.

Son rendement est :

$$\eta = \frac{\text{Puissance mécanique utile}}{\text{Puissance électrique fournie}} = \frac{P_u}{P_f}.$$

c) La puissance indiquée dans la désignation d'une machine est toujours la puissance utile. Par exemple, une génératrice de 22 kW peut fournir à ses bornes une puissance électrique de 22 kW, soit 100 A et 220 V; un moteur de 50 *ch* peut fournir à sa poulie une puissance mécanique de 50 chevaux-vapeur.

2. Principe de la mesure du rendement d'une génératrice ou d'un moteur.

a) La *méthode directe* consiste à mesurer P_f et P_u. L'une de ces puissances, P_f pour un moteur P_u pour une génératrice, est électrique : un ampèremètre et un voltmètre suffisent à la mesurer, du moins quand il s'agit de courant continu.

L'autre est une puissance mécanique. Or, la mesure d'une puissance mécanique avec un dynamomètre de transmission ou un frein de Prony n'est ni commode ni précise. On emploie donc le moins possible la méthode directe de mesure du rendement.

b) Dans les ateliers de construction électrique, on détermine le plus

souvent le rendement des machines à courant continu par la méthode dite « des pertes séparées ».

Elle consiste à évaluer, par des mesures électriques, la puissance perdue p dans la transformation d'énergie qu'effectue la machine.

Évidemment :

$$P_f - P_u = p$$

deux de ces grandeurs étant mesurées, la troisième est connue.

Le rendement d'une génératrice est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}$$

celui d'un moteur :

$$\eta = \frac{P_f - p}{P_f}.$$

3. Évaluation des pertes dans une dynamo (génératrice ou moteur).

Ces pertes comprennent :

1° les *pertes variables* avec la charge de la machine : ce sont les pertes en chaleur Joule dans l'induit et dans les inducteurs. La puissance ainsi perdue est facile à calculer quand on a mesuré la résistance des enroulements et l'intensité du courant qui les traverse;

2° les pertes que l'on admet être indépendantes de la charge. Ces *pertes constantes* sont :

a) les pertes par *frottements :* frottement de l'arbre de l'induit sur ses coussinets ou ses roulements, frottement des balais sur le collecteur, frottement sur l'air ambiant de l'induit et des ailettes de ventilation calées sur l'arbre. On admet que ces pertes ne dépendent que de la vitesse et non de la charge, quoique cela ne soit pas rigoureusement exact;

b) les pertes par *hystérésis et courants de Foucault* dans les organes de la machine soumis à un flux magnétique variable.

La puissance perdue par hystérésis dépend de la valeur de l'induction magnétique et du nombre de cycles d'aimantation par seconde, c'est-à-dire du flux et de la vitesse.

Rappelons que les courants de Foucault sont des courants d'induction dans des masses métalliques; donc ils sont fonction de l'induction magnétique et de la vitesse de rotation de l'induit qui produit les variations du flux.

On admet que les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont constantes, quelle que soit la charge, de la machine pour une vitesse et un flux déterminés. Cette hypothèse simplificatrice s'écarte un peu de la vérité.

Pour mesurer les pertes *constantes*, on fait fonctionner la machine à vide, en moteur, à excitation indépendante et on règle l'excitation pour obtenir, à la *vitesse normale* de la machine, une *f. e. é. m.* aux bornes de

l'induit *égale à la f. é. m.* de la génératrice ou à la *f. c. é. m.* du moteur en charge. On mesure alors la puissance absorbée par l'induit; on en retranche la puissance très faible consommée en chaleur Joule dans l'induit si cette puissance n'est pas négligeable et l'on obtient la puissance correspondant aux pertes constantes.

4. Exemples d'application de la méthode des pertes séparées.

A. Rendement de la machine shunt étudiée dans les leçons précédentes.

1° En génératrice à charge normale.

Conditions de fonctionnement :

Puissance utile	P_u	$= 1\,800$ W
Tension normale	U	$= 115$ V
Courant utile dans le circuit extérieur	I_u	$= 15{,}7$ A
Vitesse		1 600 *tr/mn*

Mesures et calculs préliminaires :

Résistance de l'induit à chaud, entre bornes ..	R_i	$= 0{,}93\ \Omega$
Résistance des inducteurs à chaud (y compris la partie du rhéostat en circuit)..............	R_d	$= 140\ \Omega$
Courant d'excitation à pleine charge..........	I_d	$= 0{,}82$ A
Courant dans l'induit	$I_i = I_u + I_d$	$= 16{,}5$ A
Chute de tension dans l'induit	$R_i\,I_i$	$= 15{,}4$ V
F. é. m. induite à pleine charge ...	$E = U + R_iI_i$	$= 130{,}4$ V

Essai en moteur à vide, à excitation séparée, à 1 600 *tr/mn*, 130,4 V aux bornes :

Courant dans l'induit	I_o	$= 1{,}2$ A
Puissance absorbée.........................	EI_o	$= 157$ W
Puissance perdue en chaleur Joule dans l'induit.	$R_iI_o^2$	$= 1{,}3$ W
Pertes constantes à vide	$EI_o - R_iI_o^2$	$= 156$ W

Pertes Joule, à pleine charge :

Dans l'induit............................	$R_iI_i^2$	$= 252$ W
Dans l'inducteur	UI_d	$= 94$ W

Pertes totales à pleine charge :

$$p = 156 + 252 + 94 = 502 \text{ W}$$

Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p} = \frac{1\,800}{2\,302} = 0{,}78$$

2° En moteur à charge normale.

Conditions de fonctionnement :

Tension normale...........................	U	$= 115$ W
Intensité absorbée	I_t	$= 16$ A
Puissance absorbée	$P_t = UI_t$	$= 1\,840$ W
Vitesse		1 550 *tr/mn*

Mesures et calculs préliminaires :

Résistance de l'induit à chaud, entre bornes .. $R_i = 0{,}93\ \Omega$

Résistance de l'inducteur à chaud (y compris le rhéostat)................................ $R_d = 190\ \Omega$

Courant d'excitation .... $I_d = 0{,}6$ A

Courant dans l'induit .... $I_i = I_t - I_d = 15{,}4$ A

Chute de tension dans l'induit .... $R_iI_i = 13{,}9$ V

F. c. é. m. à pleine charge .... $E' = U - R_iI_i = 101$ V

Essai en moteur à vide, à excitation séparée, à 1 550 *tr/mn* 101 V aux bornes :

Courant dans l'induit $I_o = 1{,}1$ A

Puissance absorbée .... $E'I_o = 111$ W

Pertes constantes .... $E'I_o - R_iI_o^2 = 110$ W

Pertes variables :

Dans l'induit............................ $R_iI_i^2 = 220$ W

Dans l'inducteur .... $UI_d = 69$ W

Pertes totales :

$$p = 110 + 220 + 69 = 399 \text{ W}$$

Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_f - p}{P_f} = \frac{1\,441}{1\,840} = 0{,}78$$

B. Rendement d'un moteur série.

Conditions de fonctionnement :

Tension aux bornes .... $U = 190$ V

Intensité absorbée .... $I_t = 12$ A

Puissance absorbée .... $P_f = UI_t = 2\,280$ W

Vitesse .... 560 *tr/mn*

Mesures et calculs préliminaires :

Résistance de l'induit à chaud, entre bornes .. $R_i = 1{,}65\ \Omega$

Résistance de l'inducteur à chaud .... $R_d = 0{,}94\ \Omega$

Chute de tension dans l'induit et l'inducteur en série .... $(R_i + R_d)\, I_t = 31$ V

F. c. é. m. à pleine charge.................. $E' = 159$ V

Essai en moteur à vide, *excitation séparée*, 560 *tr/mn*, 159 V aux bornes de l'induit :

Courant dans l'induit .... $I_o = 0{,}42$ A

Pertes constantes $E'I_o = 67$ W

Pertes variables :

Dans les inducteurs et l'induit...... $(R_i + R_d)\, I_t^2 = 375$ W

Pertes totales :

$$p = 67 + 375 = 442 \text{ W}$$

Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_f - p}{P_f} = \frac{1\,838}{2\,280} = 0{,}81.$$

5. Remarques sur le rendement des dynamos.

Une petite dynamo a un rendement plus grand quand on l'emploie en moteur que lorsqu'on l'emploie en génératrice. Les dynamos de moyenne et de grande puissance ont à peu près le même rendement comme génératrices et comme moteurs.

Pour une machine déterminée, le rendement varie avec la charge : il est nul à vide, évidemment; il croît très vite quand la charge augmente, pour diminuer un peu quand la machine est surchargée. Par exemple le rendement d'une dynamo de 100 kW a été trouvé de 0,817 à quart de charge, 0,898 à demi-charge, 0,912 à trois quarts de charge, 0,913 à pleine charge, 0,911 à surcharge de un quart.

Les tout petits moteurs (0,1 ou 0,2 *ch*) ont un rendement médiocre de 0,40 ou 0,50. Les machines puissantes ont actuellement un rendement excellent,(0,95 pour une génératrice de 800 kW).

6. L'échauffement des machines électriques en fonctionnement limite leur puissance : température d'équilibre.

Toute la puissance perdue dans une génératrice ou dans un moteur électrique est finalement transformée en chaleur dans la machine. Cette chaleur élève la température de la dynamo. Dès que cette température dépasse celle de l'air ambiant, la machine perd de la chaleur par rayonnement, convection et ventilation. Un équilibre s'établit et la température maximum est atteinte quand la machine dissipe par refroidissement toute la puissance calorifique qu'elle reçoit.

Cette température d'équilibre ne doit pas dépasser 90° ou 100°. Plus élevée, elle détériorerait les isolants : coton, papier, vernis, utilisés dans la fabrication des enroulements.

C'est la température limite acceptable qui détermine le maximum de puissance que peut fournir la machine. Aussi les constructeurs cherchent-ils à la réduire, d'une part en employant des tôles à faibles pertes par hystérésis et courants de Foucault, d'autre part en ventilant abondamment les enroulements avec un ventilateur calé, à l'intérieur de la carcasse, sur l'arbre de l'induit. Les machines que l'on fabrique actuellement sont, pour des puissances égales, beaucoup plus petites et plus légères que celles qui ont été construites il y a quelques dizaines d'années.

Exercices.

1. Dans certains catalogues de matériel électrique, pour certains types de moteur deux puissances sont indiquées : l'une dite *puissance en marche unihoraire* pour une marche intermittente, l'autre pour une marche continue. Quelle est celle de ces puissances qui est la plus élevée? et pourquoi? Est-ce qu'il y aurait lieu de faire cette distinction pour les très petits moteurs?

2. Calculer le rendement de la dynamo du paragraphe 4.

1° à quart de charge, quand la génératrice fournit 4 A sous 115 volts, l'intensité dans les inducteurs est alors 0,75 A;

2° à demi-charge quand elle fournit 8 A sous 115 volts, l'intensité du courant inducteur est 0,78 A;

3° à trois quarts de charge, quand elle débite 12 A sous 115 volts, l'intensité dans les inducteurs est 0,80 A

Les pertes constantes à toute charge sont 156 W.

Le rendement à pleine charge (15,7 A) a été trouvé de 0,78.

Tracer la courbe du rendement en fonction de la puissance utile.

3. Un moteur actionne un treuil dont le tambour a un diamètre de 0,21 *m* et soulève un poids de 200 *kg* à la vitesse de 30 tours du treuil par minute. La tension aux bornes du moteur est 110 volts, l'intensité absorbée 12 A. Quel est le rendement de l'installation ?

4. Une pompe centrifuge dont le rendement est 0,75 doit élever 30 m^3 d'eau par heure à une hauteur de 20 *m*. Quelle doit être la puissance du moteur de commande de la pompe?

Ce moteur aura un rendement de 0,80 et fonctionnera sous 220 V. Quelle sera l'intensité du courant nécessaire à son fonctionnement?

5. Un ascenseur de maison particulière possède les caractéristiques suivantes :

Poids de la cabine	400 *kg*
Charge maximum (4 personnes)	300 *kg*
Contrepoids	550 *kg*
Course totale	20 *m*
Vitesse en mètres par seconde	0,50 *m/s*
Rendement moyen de l'appareil	0,50

Calculer l'énergie mécanique dépensée pour une montée à pleine charge et pour une descente à vide de l'ascenseur en tenant compte du rendement.

Quelle doit être la puissance du moteur shunt commandant l'appareil?

Le rendement de ce moteur est 0,75.

L'ascenseur effectue 20 montées et 20 descentes par jour. Quelle est la dépense journalière en énergie électrique quand le kilowatt-heure est payé 0,25 NF.

6. Représenter le bilan des puissances en jeu dans une dynamo shunt en charge par le schéma suivant :

Un cours d'eau est figuré sur la feuille de papier descendant de haut en bas. Dans sa partie supérieure, il a d'abord une largeur proportionnelle à la puissance mécanique fournie à la machine. Détacher à droite un canal représentant les pertes mécaniques, qui part tangentiellement au cours d'eau principal, se recourbe et perd son contenu à l'extérieur. Un peu plus bas, à gauche, dessiner un autre canal de dérivation figurant les pertes magnétiques. Le cours d'eau principal est ainsi réduit en largeur, il représente, dans cette région, la puissance électrique produite dans la dynamo. En continuant son trajet, il donne naissance, à gauche, à une nouvelle dérivation correspondant à la puissance Joule perdue dans les inducteurs, puis, plus bas, à droite, à une dernière dérivation figurant les pertes Joule dans l'induit. Le tronçon restant représente la puissance utile UI débitée par la dynamo.

On se servira des nombres de la page 115 pour donner au schéma des dimensions vraisemblables.

Couplage des génératrices à courant continu.

1. Les dynamos se couplent comme des piles ou des accumulateurs.

Quand une seule génératrice ne suffit pas à fournir l'intensité ou la tension nécessaires à une installation, on en couple plusieurs en parallèle ou en série.

Pour un couplage en parallèle, il est indispensable que les machines aient exactement la même f. é. m. afin d'éviter des courants de circulation d'un induit à l'autre.

A cause de l'existence des circuits d'excitation, des précautions particulières doivent être prises dans certains couplages; nous les indiquerons en étudiant les modes de couplage usuels.

2. Couplage en parallèle de génératrices shunt.

a) Les usagers prennent, sur le réseau de distribution de courant, des intensités plus ou moins grandes aux différentes heures de la journée. Quand les génératrices telles que I (fig. 1) en service à la Centrale électrique ne suffisent plus à fournir l'intensité demandée, on en branche une autre telle que II sur la ligne.

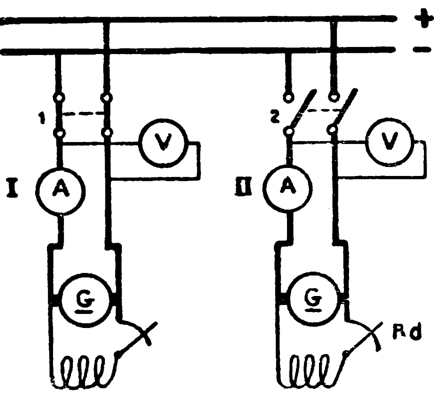


Fig. 1. — Couplage en parallèle de deux génératrices shunt.

La génératrice II est mise en marche à sa vitesse normale. Avec le rhéostat d'excitation, Rd, on règle la tension aux bornes de la machine pour qu'elle soit égale à celle du réseau et l'on ferme l'interrupteur 2. En manœuvrant les rhéostats d'excitation, on répartit la charge entre les différentes génératrices en service.

b) Ce couplage est stable : si, par suite du ralentissement fortuit du

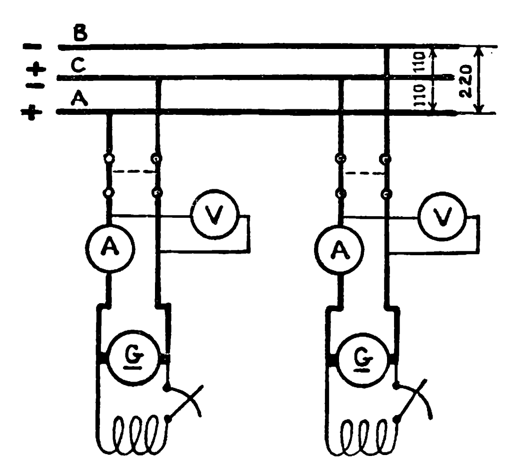


Fig. 2. — Couplage en série, défectueux, de deux dynamos shunt.

moteur de commande, la f. é. m. d'une machine diminue, cette machine fonctionne en moteur en prenant du courant sur la ligne sans que son sens de rotation change, ni la polarité de ses inducteurs. Elle reprend son rôle de génératrice quand sa vitesse ou son excitation sont augmentées.

c) Pour retirer la génératrice II du groupe en service on diminue l'intensité qu'elle fournit en réduisant son excitation. Quand son débit est très faible, on ouvre l'interrupteur 2 et l'on arrête ensuite la machine.

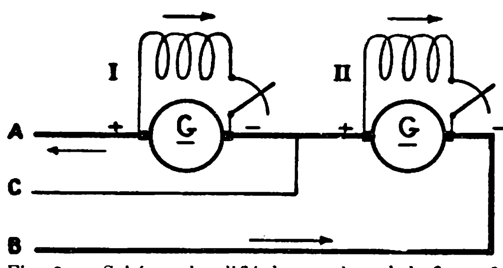


Fig. 3. — Schéma simplifié du couplage de la figure 2

Ce mode de couplage en parallèle est très employé.

3. Couplage en série de machines shunt.

Ce couplage sert surtout à obtenir avec deux génératrices à 110 volts un réseau de distribution à trois fils pour alimenter à la fois des récepteurs à 110 et à 220 volts.

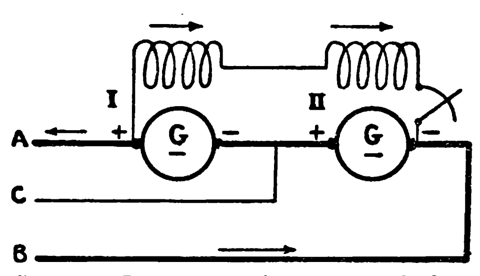


Fig. 4. — Couplage en série, correct, de deux dynamos shunt.

Le mode de branchement indiqué par la figure 2, plus schématisé dans la figure 3, présente un inconvénient. Si, pour une raison quelconque, la f. é. m. de l'une des machines, de la dynamo II par exemple, devient inférieure à la chute de tension dans son induit, la polarité de cette machine se renverse et ne se rétablit pas spontanément.

On évite cette inversion de polarité en montant les inducteurs en série

sur les barres extrêmes A et B (figure 4), mais alors les génératrices ne sont plus réglables séparément. On peut aussi prendre le courant d'excitation de la dynamo II aux bornes de la dynamo I, (fig. 5). La génératrice II fonctionne alors à excitation indépendante.

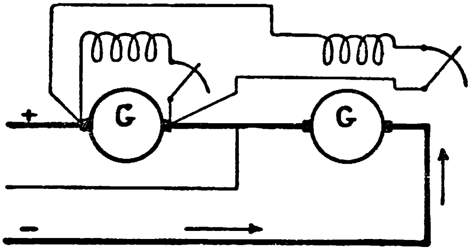


Fig. 5. — Autre mode de couplage *en série* de deux dynamos shunt; l'une des machines est à excitation indépendante.

4. Couplage en série d'une machine shunt et d'une génératrice série.

Ce mode de couplage est parfois employé quand, avec une génératrice shunt, on veut à la fois alimenter un réseau à la tension V et charger une batterie d'accumulateurs à une tension supérieure V'.

La machine série est alors de faible puissance, construite avec du fil de gros diamètre pour supporter une forte intensité. On la nomme *survolteur* (fig. 6).

5. Couplage en parallèle de génératrices compound.

Ce couplage est utilisé dans les centrales alimentant un réseau de traction à courant continu où l'emploi de machines compound est général.

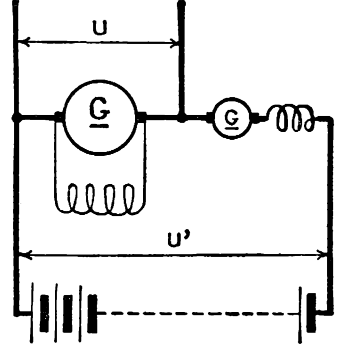


Fig. 6. — Dynamo shunt avec *survolteur*.

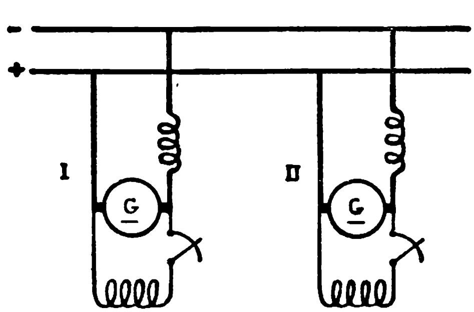


Fig. 7. — Couplage *en parallèle*, défectueux de deux génératrices compound.

Le schéma figure 7 représente un montage défectueux et dangereux. Si, pour une raison quelconque, la f. é. m. de la machine I devient plus grande que celle de la dynamo II, la machine I envoie du courant dans II dont la polarité de l'enroulement série s'inverse, le déséquilibre entre

les deux machines s'accentue et II qui fonctionne en moteur à compoundage différentiel prend à la ligne un courant important et tourne à une vitesse exagérée.

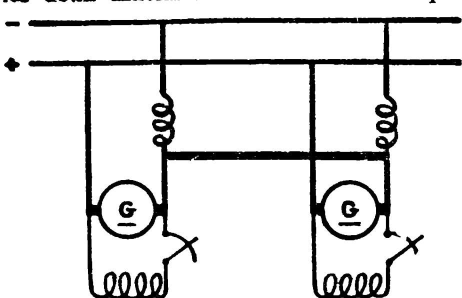


Fig. 8. — Couplage en parallèle de deux génératrices compound avec fil d'équilibre.

On évite cet inconvénient en réunissant les balais qui correspondent aux enroulements série par un gros conducteur, peu résistant, nommé fil *compensateur* ou *fil d'équilibre*. L'inversion du courant dans les enroulements série n'est plus possible.

Les manœuvres à faire pour mettre une génératrice compound en service ou pour la retirer du circuit sont les mêmes que pour une dynamo shunt.

Exercices.

1. Une installation à courant continu, est alimentée par une distribution à trois fils et deux génératrices en série (fig. 5), qui maintiennent une tension constante de 110 *V* entre leurs bornes.

La résistance de chacun des fils extrêmes est de 0,20 Ω, celle du fil commun 0,30 Ω. A l'extrémité de la ligne sont branchées une résistance de 10 Ω sur l'un des ponts et une résistance de 5 Ω sur l'autre pont. Calculer :

1° les courants dans les fils extrêmes et dans le fil commun ;

2° les tensions entre les bornes des résistances;

3° ces courants et ces tensions quand le fil d'équilibre est coupé.

2. Un moteur à excitation composée, fonctionnant sous 220 *V* et tournant à la vitesse de 2 000 *tr/mn*, a une puissance utile de 8 *ch*; son rendement à pleine charge est 0,88. La résistance de l'induit est 0,1 Ω, celle de l'enroulement série 0,04 Ω et celle de l'enroulement en dérivation, branché aux extrémités de l'induit, de 54 Ω.

Calculer :

1° le courant total absorbé par le moteur et les courants dans l'enroulement dérivation et dans l'induit;

2° la f. c. é. m.;

3° les pertes magnétiques et mécaniques;

4° la résistance du rhéostat de démarrage pour que le courant au décollage ne dépasse pas les 4/3 du courant normal;

5° le moment du couple développé par le moteur à pleine charge.

Brevet professionnel. Nantes.

3. Une dynamo excitée en dérivation charge une batterie de 60 accumulateurs montés en série.

Résistance de l'induit de la dynamo	$R = 0{,}5\ \Omega$,
— des inducteurs	$r = 250\ \Omega$,
— intérieure d'un accumulateur	$r' = 0{,}01\ \Omega$,
— des fils de connexions	négligeable,
F. é. m. d'un accumulateur	$e = 2{,}1\ V$

1° Un voltmètre placé aux bornes A et B de la machine débitant dans les accumulateurs indique $V = 137\ V$.

On demande :

a) Les intensités des courants I, i, i' parcourant l'induit, les inducteurs, les accumulateurs;

b) La f. é. m. dans l'induit;

c) Le rapport entre l'énergie emmagasinée dans les accumulateurs et l'énergie totale dépensée pour faire tourner la dynamo, abstraction faite des pertes mécaniques et magnétiques.

2° La courroie entraînant la dynamo ayant sauté, les accumulateurs débitent sur la machine.

a) Sachant que le voltmètre placé aux bornes A et B de la machine indique une d. d. p. $V = 119\ V$, on demande les intensités I_1 i_1 i'_1 des courants parcourant l'induit, les inducteurs, les accumulateurs;

b) Avant que la courroie ne saute, la machine tournait dans le sens des aiguilles d'une montre; quel est son sens de rotation après que la courroie a sauté?

4. Un moteur à excitation composée et à longue dérivation est alimenté sous une tension de 120 *V*; il tourne à la vitesse de 1 200 *tr/mn* en développant un couple utile de 3,26 *mkg* et en absorbant une puissance de 5 160 *W*. Calculer son rendement, les puissances dissipées par effet Joule dans ses enroulements et la puissance qui correspond aux pertes mécaniques et magnétiques. On donne les résistances à chaud : 0,26 Ω pour l'induit, 0,04 Ω pour l'inducteur série et 40 Ω pour l'inducteur shunt.

B. E. I.

Dessiner un schéma du moteur avec son rhéostat de démarrage (voir fig. 5, page 67 un schéma de dynamo à excitation composée). La plaque de bornes porte deux lignes horizontales de trois bornes; sur la ligne supérieure sont les deux bornes de l'inducteur en dérivation et, entre elles, une borne de l'inducteur série; sur la ligne inférieure, les deux bornes de l'induit, avec entre elles, la seconde borne de l'inducteur série.

Imaginer un moyen de repérer les bornes des inducteurs pour que le compoundage soit additionnel.

Compléments à l'étude des génératrices et des moteurs (1)

Rappelons que les principaux facteurs qui caractérisent le fonctionnement d'une génératrice à courant continu sont liés, dans le cas d'une machine bipolaire, par les deux relations :

$$E = n.N.\Phi. \quad (1)$$

$$U = E - RI - e \quad (2)$$

dans lesquelles E représente la f. é. m., n la vitesse de rotation en tours par seconde, N le nombre de conducteurs de l'induit, Φ le flux dans l'entrefer sous un pôle, U la tension entre les bornes de la machine quand elle débite un courant I, R la résistance de l'induit, e la réaction magnétique de l'induit.

Remarquons que N est invariable, il est fixé lors de la construction de l'induit. R peut être modifié par la mise en série de résistances avec l'induit. E, U, I, n sont déterminés par des mesures simples avec des appareils d'usage courant. e est obtenue par l'essai de la dynamo en charge, elle varie avec le débit et aussi avec l'aimantation de la machine; pour les génératrices de faible puissance, e ne dépasse pas 2,5 % de E, sa valeur relative est encore plus faible quand il s'agit de génératrices puissantes, à pôles de commutation, dont les balais restent calés sur la ligne neutre à toutes charges, aussi néglige-t-on souvent la réaction de l'induit dans des études dont la précision est faible.

Quant à Φ, c'est une grandeur qui n'est guère évaluée que dans les projets de construction de machines. Pour une dynamo existante, Φ pourrait être mesuré dans un laboratoire, la machine à l'arrêt. Industriellement, on mesure le courant i dans les inducteurs. Ce courant et le flux qu'il produit ne sont pas liés par une relation algébrique. En pratique, puisque E est une fonction de i, on détermine expérimentalement la courbe $E = f(i)$ pour une valeur fixée de n, c'est la *caractéristique à vide* de la machine et l'on s'y réfère pour connaître l'effet produit sur la f. é. m. de la machine par une variation du courant inducteur.

1. Ces compléments sont destinés surtout aux candidats au Brevet professionnel.

Dans le cas d'une dynamo fonctionnant en moteur, la réaction magnétique de l'induit est plus faible encore qu'en génératrice et on la néglige. Les deux relations fondamentales deviennent :

$$E' = n.N.\Phi. \quad (3)$$
$$U = E' + RI. \quad (4)$$

I. RHÉOSTATS DE CHAMP

1. Calcul de la résistance d'un rhéostat de champ de génératrice excitée en dérivation.

Une génératrice shunt est construite pour débiter un courant I sous une tension U en tournant à une vitesse fixée *n*. Si le circuit extérieur absorbe un courant I′ inférieur à I′ la tension aux bornes augmente. Pour ramener cette tension à la valeur U, on diminue l'intensité d'excitation *i* avec un rhéostat de champ inséré dans le circuit inducteur. La plus grande résistance à insérer correspond évidemment à un débit nul. C'est cette résistance *r* qu'il s'agit de déterminer.

Quand le courant débité est nul, la f. é. m. E de la génératrice est sensiblement égale à la tension aux bornes U. Sur la caractéristique à vide $E = f(i)$ à vitesse constante *n*, déterminons le point d'ordonnée $E = U$; l'abscisse de ce point donne la valeur du courant inducteur correspondant, soit *i*.

Si la vitesse pour laquelle la caractéristique a été tracée est *n′*, différente de *n*, nous substituons à E la valeur $E' = E \times \frac{n'}{n}$ puisque pour un flux ou un courant inducteur déterminés, les f. é. m. sont proportionnelles aux vitesses de rotation.

Connaissant *i*, nous calculons la résistance totale du circuit inducteur : $R_1 = U : i$. Si la résistance propre des bobines inductrices est R′ la résistance du rhéostat de champ doit être :

$$r = R_1 - R'.$$

Le fil résistant utilisé pour la fabrication du rhéostat doit pouvoir supprter indéfiniment l'intensité *i* sans dépasser la température de 200°C. Pour qu'un réglage précis soit possible, un rhéostat de champ comporte beaucoup de plots, de 12 à 60. Les résistances entre plots sont égales.

2. Rhéostat de champ d'un moteur excité en dérivation.

Une variation de vitesse de 1 à 2 est possible par rhéostat de champ pour un moteur shunt ordinaire alimenté à tension constante Avec un moteur d'une construction mécanique appropriée et muni de pôles de commutation, la vitesse peut varier de 1 à 5. Le rhéostat de champ doit être combiné avec le rhéostat de démarrage pour que le décollage du moteur soit toujours effectué avec le flux maximum.

La nature des appareils entraînés détermine l'intensité absorbée par le moteur. Par exemple, un moteur peut fonctionner soit à *puissance constante*, soit à *couple constant.*

1° La puissance utile fournie par un moteur est $P = \eta\,UI$. Si l'on admet que le rendement η est invariable quelle que soit la vitesse, comme U est constant, l'intensité absorbée I est constante quand la puissance P ne change pas.

2° Le couple d'un moteur qui tourne à n tours par minute en absorbant I ampères sous une tension de U volts est :

$$M = \frac{60}{2\pi.9,81} \cdot \frac{\eta UI}{n} \text{ mètres-kilogrammes.}$$

Pour qu'il soit constant quand la vitesse varie, il faut que I et n soient proportionnelles.

Soit un moteur excité en dérivation absorbant un courant I dans l'induit sous une tension U et tournant alors à n *tours par minute; la résistance de l'induit est R, celle des bobines inductrices R'. La caractéristique à vide* $E = f(i)$ *à la vitesse* n *est donnée. Proposons-nous de calculer la résistance du rhéostat de champ permettant de faire varier la vitesse du moteur de* n_1 *à* n_2 $(n_1 < n < n_2)$, *la puissance du moteur restant constante.*

Le courant dans l'induit conserve la même valeur I à toute charge. La f. c. é. m. de l'induit $E' = U - RI$ est donc constante. Le courant inducteur qui produit E' à la vitesse n_2 donnerait à la vitesse n $E_2 = E' \times \frac{n}{n_2}$. Soit le point d'ordonnée E_2 sur la caractéristique à vide, son abscisse i_2 donne la valeur du courant inducteur correspondant à la vitesse n_2. Puisque la tension aux bornes du circuit inducteur est U, la résistance totale de ce circuit est :

$$r_2 = U : i_2.$$

Nous déterminerons de même i_1 pour la vitesse n_1 et

$$r_1 = U : i_1$$

Le rhéostat de champ aura pour résistance r_1 — R'.
La plus faible vitesse n_1 ne pourra être atteinte que si l'on a

$$r_1 > R'.$$

3. Réglage de la vitesse d'un moteur série.

a) Par une résistance en série avec l'induit.

Quand le courant absorbé par un moteur série alimenté à tension constante *diminue*, la vitesse du moteur *s'accroît*. Pour la ramener à sa première valeur, on met une résistance en série avec la machine.

Soient U la tension d'alimentation, I le courant absorbé, R la résistance de l'induit, R' la résistance de l'inducteur, n' la vitesse à obtenir, r *la résistance à mettre en série que nous voulons déterminer. La caractéristique à vide, à excitation séparée, pour la vitesse* n *est donnée.*

La f. c. é. m. du moteur à la vitesse n' doit être :

$$E' = U - (R + R' + r)I.$$

Pour le même courant d'excitation I, la caractéristique à vide indique que la f. c. é. m. a pour valeur E à la vitesse n; cette valeur devient à la vitesse n'.

$$E' = E \times \frac{n'}{n}.$$

En égalant ces deux valeurs de E', nous obtenons une relation qui détermine r :

$$U - (R + R' + r)I = E \times \frac{n'}{n}$$

$$r = \frac{U - E \times \frac{n'}{n}}{I} - (R + R').$$

En somme, ce procédé de réglage consiste à réduire la tension appliquée aux bornes du moteur de r I volts. Il en résulte une perte de puissance en chaleur Joule de $r I^2$ watts..

b) Par shuntage des inducteurs.

Quand le courant absorbé par un moteur série alimenté à tension constante *augmente*, la vitesse du moteur *diminue*. Pour la ramener à sa première valeur, on affaiblit le flux inducteur en shuntant les bobines inductrices.

Soient U la tension d'alimentation, I le courant total absorbé, R la résistance de l'induit, R' la résistance de l'inducteur; nous nous proposons de

déterminer le courant I' dans les inducteurs qui donnera à l'induit la vitesse n'.

La caractéristique à vide de la dynamo à excitation séparée, pour la vitesse n *est donnée.*

Parce que le courant I' est inconnu, nous ne pouvons calculer la chute de tension dans les inducteurs et la f. c. é. m. du moteur. Il faut procéder par tâtonnements, nous donner différentes valeurs de I', soit I_1, I_2, I_3..., calculer les vitesses n_1, n_2, n_3... correspondantes, tracer la courbe de la vitesse en fonction du courant inducteur et nous servir de cette courbe pour déterminer la valeur de I' correspondant à n'.

Quand le courant dans l'induit est I, I_1 dans les inducteurs, la f. c. é. m. du moteur a pour valeur :

$$E_1 = U - RI - R'I.$$

Pour un courant inducteur I_1, la caractéristique à vide indique que la f. c. é. m. est E' à la vitesse n; la vitesse qui donne une f. c. é. m. E_1 pour la même excitation est :

$$n_1 = n \times \frac{E_1}{E'}.$$

Ce premier calcul permet de choisir I_2, I_3, ... pour que les vitesses correspondantes n_2, n_3... encadrent d'assez près la valeur n'.

La courbe $n_1 = F(I_1)$ donne ainsi une valeur suffisamment précise de I'.

Connaissant I', il est facile de déterminer la résistance s qui doit shunter R'. Le courant dans R' sera I', le courant dans s sera I — I'. Puisque les deux résistances ont mêmes extrémités :

$$R'I' = s(I - I')$$

d'où

$$s = R' \times \frac{I'}{I - I'}.$$

Exercices.

1. **Une génératrice excitée en dérivation, 10 kW, 115 V, 1 200 tr/mn, a donné** aux **essais à sa** vitesse normale :

1° à vide, à excitation indépendante :

courant d'excitation........	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00 ampères
f. é. m..................	48	81	101	115	122	127 volts

2° en charge, auto-excitation, résistance du circuit inducteur constante :

débit....................	0	45	80	90	95	100 ampères.
tension aux bornes	115	113	109,5	107,5	106	104 volts.

La résistance des bobines inductrices est 40 ohms.

Calculer la résistance du rhéostat d'excitation nécessaire **pour maintenir la tension**

aux bornes à 115 V quand la puissance fournie par la machine varie de 0 à 10 kW, sa vitesse restant à 1 200 tr/mn.

Quand le rhéostat est tout entier hors circuit, quel est le courant que la dynamo peut fournir sous 115 V?

2. La courbe de réglage d'une génératrice shunt est la courbe I = f (*i*) du courant débité I en fonction du courant inducteur *i*, la tension aux bornes de la machine restant constante ainsi que sa vitesse.

Les mesures effectuées pour obtenir la courbe de réglage d'une petite génératrice à 115 V tournant à 2 000 tr/mn ont donné :

Débit	0	2	5	8	10	13	16	18 ampères
Excitation ...	0,56	0,57	0,59	0,63	0,66	0,725	0,79	0,83 ampère

La résistance des bobines inductrices est 112 Ω à la température de 20 °C.

1° Tracer la courbe de réglage avec les échelles suivantes : débit : 5 mm pour 1 ampère, excitation : 250 mm pour 1 ampère.

2° Déterminer la résistance du rhéostat de champ capable de régler la tension à 115 V quand le débit varie de 0 à 16 A, la température des bobines inductrices en cuivre atteignant 60 °C.

3. Un moteur excité en dérivation absorbe, à charge normale, 17,4 ampères dans l'induit, sous une tension de 115 volts, et tourne à 1 400 tours par minute. La résistance de l'induit est 0,44 ohm, celle des bobines inductrices 62,5 ohms.

Essayée en génératrice à vide, à excitation indépendante, à la vitesse de 1 400 tours par minute, la machine a donné :

Excitation	0,81	0,96	1,11	1,23	1,50	1,74	2,13 ampères
F. é. m..............	90	99	108	115	128,5	137	149 volts

1° Calculer la résistance du rhéostat de champ pour que le moteur, alimenté à 115 volts, tourne à 1 800 tours par minute :

a) en donnant sa puissance normale,
b) en fournissant son couple normal.

2° Calculer la vitesse du moteur quand le rhéostat de champ est tout entier hors circuit, le moteur fournissant sa puissance normale.

On admettra que le rendement du moteur reste le même dans les trois cas considérés.

4. Un moteur série absorbe à charge normale 14 ampères sous 220 volts et tourne à la vitesse de 1 450 tours par minute. La résistance de l'induit est 0,62 ohm, celle de l'inducteur 0,85 ohm.

Essayée en génératrice à vide, à excitation séparée, à la vitesse de 1 450 tours par minute, la machine a donné :

Excitation	3	6	10	14	18 ampères
F. é. m...........................	90	143	177	199,4	212 volts.

Quelle résistance faut-il mettre en série avec le moteur pour qu'il tourne à 1 000 tours par minute en absorbant 12 ampères sous 220 volts?

Quelle est alors sa puissance et son rendement est 0,75?

5. Calculer la résistance du shunt à placer entre les bornes de l'inducteur du moteur faisant l'objet de l'exercice précédent pour qu'il tourne à 2 000 tours par minute en absorbant 15 ampères sous 220 volts?

II. RHÉOSTATS DE DÉMARRAGE

1. Moteur à excitation en dérivation ou indépendante alimenté à tension constante.

a) Résistance totale du rhéostat de démarrage.

Soient U la tension d'alimentation,

R la résistance de l'induit,

I le courant dans l'induit à pleine charge,

I_d l'intensité admise au *décollage*, c'est-à-dire à l'instant où l'induit encore immobile va commencer à tourner,

R' la résistance de démarrage en série avec l'induit.

Puisqu'au décollage l'induit est immobile, sa f. c. é. m. est nulle et

$$U = (R + R')I_d, \qquad \text{d'où} \qquad R' = \frac{U}{I_d} - R.$$

La pointe d'intensité I_d à ne pas dépasser a été fixée, en fonction de I par l'Union Technique des Syndicats de l'Électricité (UTE). On peut admettre, pour un moteur fournissant une puissance utile[1] :

de 0,75 à 1 kW : $I_d = 3,3\ I$
de 1,5 à 5 kW : $I_d = 2,5\ I$
de 5 à 15 kW : $I_d = 1,6\ I$
plus de 15 kW : $I_d = 1,35\ I$

b) Répartition de la résistance entre plots.

Quand on emploie un démarreur automatique par contacteurs, on réduit le nombre des subdivisions de la résistance pour simplifier le démarreur. La même tendance se marque actuellement pour les rhéostats à plots. Par exemple, on descend jusqu'à

2 plots	pour un moteur fournissant	de 0 à 1 kW.
4 plots	—	de 1 à 7 kW.
5 plots	—	de 7 à 22 kW.

1° ***Les résistances entre plots ne doivent pas être égales.***

Montrons sur un exemple l'inconvénient d'une résistance de démarrage divisée en fractions égales :

L'induit d'un moteur shunt absorbe à pleine charge 60 *A sous* 108 *V. Il tourne alors à* 519 tr/mn. *Sa résistance est* 0,07 Ω. *Le rhéostat de démarrage porte* 4 *plots, sa résistance totale est* 0,93 Ω, *les trois fractions du rhéostat ont des résistances égales, soit* 0,31 Ω. *On effectue le démarrage*

1. Plusieurs grandes Administrations techniques, telles que la Marine militaire et la SNCF, expriment la puissance utile des moteurs en kilowatts et non en chevaux.

en attendant, pour faire passer la manette du rhéostat d'un plot au suivant que le courant dans l'induit ait atteint sa valeur normale, soit 60 A.

Calculons : 1° *la pointe d'intensité qui se produit à l'arrivée de la manette du rhéostat sur chaque plot;* 2° *la vitesse de l'induit quand cette manette quitte le plot.*

La f. c. é. m. de l'induit *à pleine charge* atteint :

$$E' = U - RI = 108 - 0{,}07 \times 60 = 103{,}8 \text{ V}$$

La vitesse est alors 519 *tr/mn.* Rappelons qu'à excitation constante f. c. é. m. et vitesse sont proportionnelles.

Au premier temps du démarrage, à l'arrivée de la manette sur le premier plot, la f. c. é. m. est nulle, le courant absorbé est :

$$I_d = U : (R + R') = 108 : (0{,}07 + 0{,}93) = 108 \text{ A.}$$

Le moteur démarre, la f. c. é. m. qui était nulle croît, le courant absorbé diminue. Quand il atteint 60 A, la f. c. é. m. E_1 devient :

$$E_1 = U - (R + R')I = 108 - 60 = 48 \text{ V.}$$

La vitesse est

$$n_1 = n \times \frac{E_1}{E'} = 519 \times \frac{48}{103{,}8} = 240 \ tr/mn.$$

Au second temps du démarrage, la résistance du rhéostat est devenue 0,62 Ω, la pointe de courant atteint :

$$(108 - 48) : (0{,}07 + 0{,}62) = 87 \text{ A.}$$

La f. c. é. m. a pour valeur quand le courant est devenu 60 A :

$$108 - (0{,}69 \times 60) = 66{,}6 \text{ V}$$

et la vitesse $$519 \times \frac{66{,}6}{103{,}8} = 333 \ tr/mn.$$

Au troisième temps, la résistance du rhéostat est 0,31 Ω, la pointe de courant atteint :

$$(108 - 66{,}6) : (0{,}07 + 0{,}31) = 108{,}7 \text{ A.}$$

La f. c. é. m. monte à

$$108 - (0{,}38 \times 60) = 85{,}2 \text{ V}$$

et la vitesse correspondante à :

$$519 \times \frac{85{,}2}{103{,}8} = 426 \ tr/mn.$$

Au quatrième et dernier temps, la résistance du circuit est 0,07 Ω, ce qui donne pour la pointe de courant

$$(108 - 85{,}2) : 0{,}07 = 325 \text{ A}$$

la f. c. é. m. devient 103,8 V et la vitesse 519 *tr/mn.*

Les pointes de courant sont irrégulières et la dernière qui atteint 5,4 fois le courant normal est excessive : les résistances entre plots du démarreur ne doivent pas être égales.

2° ***Cherchons une division rationnelle de la résistance de démarrage.***

a) Calcul de R_1. (fig. 1).

Au décollage :

$$I_d = \frac{U}{R_1} \qquad \text{d'où} \qquad R_1 = \frac{U}{I_d} = \frac{U}{KI}$$

K désignant le rapport de l'intensité au décollage I_d à l'intensité à pleine charge I.

U et I_d sont connus; R_1 peut être calculé.

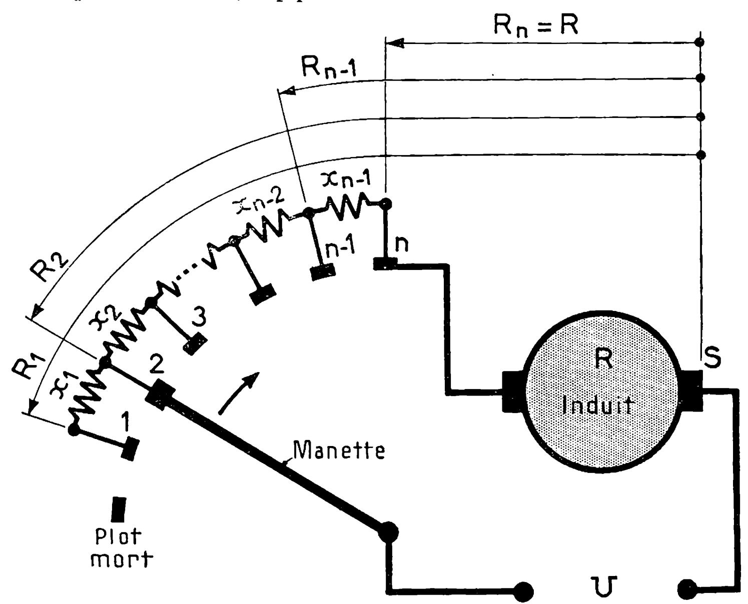


Fig. 1. — Schéma d'un *rhéostat de démarrage.*

U tension d'alimentation.
1, 2, 3 ... n plots du rhéostat.
R_1 résistance du plot 1 à la borne S.
R_2 résistance du plot 2 à la borne S.
R_n résistance du plot n à la borne S.
R résistance de l'induit.
x_1 résistance du rhéostat entre les plots 1 et 2.
x_2 résistance du rhéostat entre les plots 2 et 3.
x_{n-1} résistance du rhéostat entre les plots $n - 1$ et n.

Après décollage, le moteur tourne de plus en plus vite; sa f. c. é. m augmente, le courant diminue; quand il est égal à I, la f. c. é. m. a une certaine valeur E, telle que :

$$I = (U - E) : R_1$$

b) Calcul de R_1, R_2, ... R_n.

Analysons le passage du 1er au 2e plot :

Immédiatement avant : $I = (U - E) : R_1$
Immédiatement après : $I_d = (U - E) : R_2$

car pendant le passage, la vitesse et par suite la f. c. é. m. n'a pas eu le temps de changer.

Il en résulte que :

$$R_1 I = R_2 I_d \qquad \text{ou} \qquad R_2 = R_1 \frac{I}{I_d} = \frac{R_1}{K}$$

De même :

$$R_3 = \frac{R_2}{K} \qquad R_4 = \frac{R_3}{K} \qquad R_n = \frac{R_{n-1}}{K} = R$$

car lorsque la manette est placée sur le ne et dernier plot $R_n = R$.

Nous pouvons ainsi calculer R_{n-1}, R_{n-2}, ..., R_2, R_1 de proche en proche; ces résistances sont les termes d'une progression géométrique croissante dont le premier terme est R et la raison K.

c) Calcul de x_1, x_2 ...

$$x_1 = R_1 - R_2 = KR_2 - R_2 = (K - 1)R_2$$

De même : $x_2 = (K - 1)R_3$ d'où $\dfrac{x_1}{x_2} = \dfrac{R_2}{R_3} = K$

Ce qui permet de calculer immédiatement

$x_{n-1} = (K - 1)R$, puis de proche en proche

$x_{n-2} = Kx_{n-1}, \ldots \qquad x_2 = Kx_3, \qquad x_1 = Kx_2$

d) Relation entre $K = I_d : I$ et n nombre de plots.

Remarquons que :

$$R_1 = KR_2 = K^2R_3 = \ldots = K^{n-1}.R_n$$

mais $R_n = R$, donc $R_1 = K^{n-1}.R$;

on a également $R_1 = U : I_d = U : KI$,

donc $\dfrac{U}{KI} = K^{n-1}.R \qquad \dfrac{U}{RI} = K^n$

RI représente la chute de tension interne u en charge, d'où la relation :

$$\frac{U}{u} = K^n$$

U, R et I sont des données; donc K^n est connu, ce qui permet soit de se donner n et de calculer K, soit de se donner K et de calculer n.

Il est préférable de se donner n qui doit être entier et déterminer K. On vérifiera que ce rapport est bien compris dans les limites que nous avons indiquées page 130. S'il est trop grand on augmentera n de 1 ou 2 unités et l'on recommencera le calcul.

e) Réalisation des résistances.

On choisit un fil ou un ruban résistant qui puisse supporter la moyenne des intensités I_d et I, soit $(I_d + I) : 2$ pendant 10 ou 20 secondes sans que la température dépasse 300 °C.

Dans le cas de *démarrage manuel*, le temps de séjour de la manette sur chaque plot est tel que le démarrage à pleine charge dure environ 10 secondes pour un moteur de moins de 50 *chevaux* et 20 secondes pour un moteur plus puissant.

Dans le cas de *démarrage automatique* par contacteurs, chaque contacteur de court-circuitage des fractions de résistance du démarreur est muni d'un relais électromécanique dit *relais d'accélération* réglé pour obtenir une durée convenable du démarrage.

2. Moteur excité en série.

Dans le calcul qui précède des résistances du rhéostat d'un moteur shunt aux différents temps du démarrage n'intervient aucun facteur provenant du mode d'auto-excitation Les conclusions de ce calcul conviennent donc aussi pour un moteur série.

Dans ce cas, *la résistance R est la somme des résistances de l'induit et de l'inducteur.*

A titre d'exemple, *calculons les résistances de démarrage d'un moteur série. Il s'agit d'un moteur de tramway absorbant à pleine charge* 52 A *sous* 500 V, *la résistance de l'induit est* 0,40 Ω, *celle de l'inducteur* 0,50 Ω, *le démarrage s'effectue en* 6 *temps.*

La résistance R du moteur est 0,40 + 0,50 = 0,90 Ω.

Pour l'intensité normale I = 52 A, la chute ohmique dans le moteur est

$$u = 0{,}90 \times 52 = 46{,}8 \text{ V}.$$

En désignant par I_d la pointe d'intensité au début de chaque temps de démarrage, nous devons avoir

$$K = \frac{I_d}{I} = \sqrt[6]{\frac{500}{46{,}8}}$$

donc

$$\log \frac{I_d}{I} = (\log 500 - \log 46{,}8) : 6$$

$$= 0{,}17145$$

$$\frac{I_d}{I} = 1{,}48.$$

Ce rapport est un peu grand : parce qu'il s'agit d'un robuste moteur de traction, nous pouvons pourtant le retenir.

La pointe d'intensité I_d a pour valeur :

$$I_d = 1{,}48\ I = 1{,}48 \times 52 \simeq 77 \text{ A}.$$

Pour les résistances correspondant à chaque plot, on a :

$R_6 = 0{,}9\ \Omega$, $R_5 = 0{,}9 \times 1{,}48 = 1{,}34\ \Omega$, $R_4 = 1{,}99\ \Omega$, $R_3 = 2{,}95\ \Omega$, $R_2 = 4{,}38\ \Omega$, $R_1 = 6{,}49\ \Omega$.

et pour les résistances entre plots, dans l'ordre de leur élimination par la manœuvre du rhéostat :

$$2{,}11\,\Omega — 1{,}43\,\Omega — 0{,}96\,\Omega — 0{,}65\,\Omega — 0{,}44\,\Omega.$$

La résistance totale du rhéostat est 5,59 Ω.

Exercices.

1. Montrer que la pointe d'intensité qui se produit au démarrage d'un moteur est la même, que le moteur soit à vide ou en charge.

Quelle est l'influence de la charge dans le démarrage?

2. Montrer que les résistances r_1, r_2, r_3,... r_{n-1}, entre plots du rhéostat de démarrage forment une progression géométrique décroissante.

3. L'induit d'un moteur shunt absorbe à pleine charge 60 A sous 108 V. Il tourne alors à 519 *tr/mn*. Sa résistance est 0,07 Ω. Le rhéostat porte 4 plots. Calculer :

1° les résistances intercalées entre chaque plot pour que la pointe d'intensité soit la même quand la manette du rhéostat arrive sur chaque plot, l'intensité étant de 60 A quand on passe la manette d'un plot sur le suivant.

2° la vitesse de l'induit correspondant à chaque plot pour un courant absorbé de 60 A.

4. Un moteur série de 5 *ch*, 115 V. a un rendement de 0,80 à pleine charge, sa vitesse est alors 1 000 *tr/mn*. La résistance de l'induit est 0,08 Ω, celle de l'inducteur 0,06 Ω.

Calculer les résistances d'un rhéostat de démarrage à 4 plots pour ce moteur. Les pointes d'intensité pendant le démarrage seront toutes égales, l'intensité absorbée ne descendra pas au-dessous de l'intensité de charge normale.

Calculer aussi les vitesses du moteur quand la manette du rhéostat passe d'un plot sur le suivant.

III. FONCTIONNEMENT D'UNE GÉNÉRATRICE EN MOTEUR ET INVERSEMENT

Une dynamo fonctionne à volonté comme génératrice ou comme moteur. Puisque dans les deux cas c'est la même machine, il doit être possible quand on connaît ses propriétés en tant que génératrice de déterminer ses propriétés en tant que moteur et inversement.

Nous allons montrer par quelques exemples comment en partant des caractéristiques d'une dynamo fonctionnant en génératrice on obtient ses caractéristiques en moteur et inversement.

1. Fonctionnement en moteur d'une génératrice série.

Étant donnée la caractéristique à vide d'une dynamo série, tracée avec une excitation indépendante, pour la vitesse de n *tours par minute, nous nous proposons de déterminer :*

1° *la caractéristique de vitesse* $n = f(I)$,
2° *la caractéristique électromécanique* $M = \varphi(I)$,
3° *la caractéristique mécanique* $M = F(n)$

de la machine fonctionnant en moteur sous une tension constante de U volts. La résistance de l'induit est R ohms, celle de l'inducteur R' ohms, la réaction magnétique de l'induit est négligeable.

1° Calculons un point de la caractéristique de vitesse, c'est-à-dire la vitesse n_1, du moteur quand il absorbe un courant I_1 sous la tension U.

La chute de tension dans le moteur est $(R + R') I_1$, la f. c. é. m. de la machine est donc $E_1 = U - (R + R') I_1$.

La caractéristique à vide indique que pour un courant inducteur I_1, la f. c. é. m. est E' à la vitesse de n tours par minute.

A courant inducteur constant, vitesse et f. c. é. m. sont proportionelles, donc :

$$n_1 = n \times \frac{E_1}{E'}.$$

En calculant plusieurs valeurs de n_1 pour des valeurs différentes de I_1, on pourra tracer la caractéristique $n = f(I)$.

2° La puissance électrique qui produit la vitesse n_1 de l'induit est $E_1 I_1$. Le couple correspondant a pour valeur en mètres-kilogrammes :

$$M = \frac{E_1 I_1 \times 60}{9,81 \times 2\pi n_1}$$

Nous venons de voir qu'en se donnant I_1 on peut déterminer E_1 et n_1
Le calcul de M effectué pour plusieurs valeurs de I_1 permet de tracer la courbe $M = \varphi$ (I).

3° Pour chacune des valeurs de I_1 des calculs précédents, on obtient une valeur de n_1 et une valeur correspondante de M : la courbe $M = F(n)$ peut donc être tracée.

Remarquons que le couple ainsi calculé, que l'on nomme *couple électromagnétique* n'est pas le couple utile disponible sur l'arbre du moteur, il le dépasse de quelques centièmes qui correspondent aux pertes mécaniques et magnétiques dans la machine.

2. Fonctionnement en moteur d'une génératrice shunt.

Étant donné la caractéristique à vide de la dynamo tracée pour la marche en génératrice à excitation indépendante quand la vitesse est n *tr/mn, nous nous proposons de déterminer les caractéristiques de vitesse* $n = f$ (I), *électromécanique* $M = \varphi$ (*I*) *et mécanique* $M = F$ (n) *de la machine fonctionnant en moteur sous une tension constante U. La résistance de l'induit est R, celle de l'inducteur R'; la réaction magnétique de l'induit est négligeable.*

1° Calculons la vitesse du moteur n_1 quand l'induit absorbe un courant I.
La f. c. é. m. du moteur est alors $E_1 = U - RI_1$.
L'intensité du courant inducteur est $i = U : R'$, elle est constante.
La caractéristique à vide indique que ce courant produit une f. c. é. m. E' à la vitesse de n tours par minute. Donc :

$$n_1 = n \times \frac{E_1}{E'}.$$

En effectuant ce calcul pour plusieurs valeurs de I_1 on peut tracer la courbe $n = f$ (I).

2° La puissance électrique qui produit la vitesse n_1 de l'induit est $E_1 I_1$, d'où le couple électromagnétique.

$$M = E_1 I_1 \times \frac{60}{9{,}81 \times 2\pi n_1}.$$

Les courbes $M = \varphi$ (I) et $M = F(n)$ peuvent donc être obtenues.

3. Fonctionnement en génératrice d'un moteur série.

Soit la caractéristique de vitesse $n = f$ (*I*) *d'un moteur série alimenté à la tension constante U. Proposons-nous d'en déduire la caractéristique à vide E* = f (*I*), *à excitation séparée, de la dynamo fonctionnant en génératrice à la vitesse* n'. *La résistance de l'induit est R, celle de l'inducteur R'. La réaction magnétique de l'induit est négligeable.*

La caractéristique de vitesse fournit les valeurs de la vitesse n_1, n_2... etc. correspondant à différentes valeurs I_1, I_2... et . du courant absorbé.

Pour un courant I_1. la f. c. é. m. du moteur est :

$$E_1 = U - (R + R') I_1.$$

Pour le même courant d'excitation I_1, la f. é. m. de la génératrice à la vitesse n' est

$$E'_1 = E_1 \times \frac{n'}{n_1}.$$

Cette valeur donne un point de la caractéristique à vide cherchée. On obtiendra d'autres points de la même façon.

A partir de la courbe $E = f(I)$, on déterminera facilement la caractéristique en charge $U = \varphi(I)$ à la vitesse n' puisque

$$U = E - (R + R') I.$$

4. Fonctionnement en génératrice d'un moteur shunt.

Le courant d'excitation d'un moteur shunt alimenté à tension constante U, dont la résistance d'inducteur est R' a une valeur fixe $i = U : R'$ quel que soit le courant dans l'induit. Il en résulte que, de la caractéristique de vitesse $n = \varphi(I)$ d'un moteur shunt à tension constante, il n'est pas possible de tirer des propriétés de la machine fonctionnant en génératrice avec une excitation différente.

Mais il est possible de déterminer la caractéristique à vide de la génératrice en faisant tourner le moteur à vide avec tension aux bornes et excitation variables réglées de façon que la vitesse reste à peu près constante. Il suffit que nous indiquions comment on obtient un point de cette caractéristique.

Soient U_1 la tension d'alimentation, I_1 *le courant dans l'induit,* i_1 *le courant inducteur,* n_1 *la vitesse, R la résistance de l'induit. La caractéristique à vide,* $E = f(i)$, *doit être tracée à la vitesse* n.

La f. c. é. m. du moteur est $E_1 = U_1 - RI_1$; c'est la f. é. m. de la génératrice à vide pour un courant d'excitation i_1, à la vitesse n Pour a même excitation i_1, à la vitesse n elle devient

$$E = E_1 \times \frac{n}{n_1}.$$

Les valeurs faibles de E sont mal déterminées par ce procédé.

Exercices.

1. Un moteur excité en dérivation tourne à 1 525 *t/mn* en absorbant 13,6 A sous 220 V. La résistance de l'induit est 0,84 Ω et celle de l'inducteur 315 Ω.

On emploie la machine en génératrice. A quelle vitesse faut-il la faire tourner pour qu'elle débite 30 A sous 220 V dans le circuit extérieur?

2. Un moteur excité en série tourne à 1 500 *tr/mn* en absorbant 13,6 A sous 220 V. La résistance de l'induit est 0,77 Ω, celle de l'inducteur 1,06 Ω.

1° quelle est la f. c. é. m. de l'induit?
2° quel est le couple électromagnétique fourni par l'induit?
3° on alimente le moteur sous 110 V, calculer sa vitesse quand il absorbe 13,6 A.
4° quel est alors son couple électromagnétique?

3. Pour obtenir la caractéristique à vide à excitation indépendante d'une dynamo, on la fait fonctionner en moteur excité en dérivation et l'on effectue les mesures suivantes :

U = ...	240	220	200	175	160	140 volts
I = ...	0,815	0,84	0,92	1,05	1,10	1,3 ampère
i = ...	0,62	0,60	0,46	0,40	0,35	0,30 ampère
n = ...	1650	1595	1650	1570	1570	1520 tr/mn.

U est la tension aux bornes, I le courant dans l'induit, i le courant dans l'inducteur, *n* la vitesse de l'induit.

La résistance de l'induit est 0,84 Ω.

Tracer la caractéristique à vide de la machine à la vitesse de 1 600 *tr/mn*.

4. On emploie la machine faisant l'objet de l'exercice 3 comme moteur excité en dérivation alimenté à 220 V. La résistance de l'inducteur est 315 Ω.

Déterminer et tracer la caractéristique de vitesse $n = f(I)$ de ce moteur.

5. Une dynamo essayée en génératrice à vide à excitation séparée, à la vitesse de 1 600 *tr/mn*, a donné :

excitation	3	6	10	14	18 ampères
f. é. m.	99	157	195	220	234 volts

La résistance de l'induit est 0,75 Ω, celle de l'inducteur 0,55 Ω.

On emploie la machine comme moteur série en l'alimentant à la tension constante de 220 V. Déterminer et tracer :

1° sa caractéristique de vitesse $n = f(I)$.
2° sa caractéristique électromécanique $M = \varphi(I)$.
3° sa caractéristique mécanique $M = F(n)$.
M représente le couple électromagnétique de l'induit.

IV. FREINAGE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

1. Le freinage d'un moteur est quelquefois utile ou nécessaire.

Dans certaines machines-outils commandées électriquement, les masses en mouvement sont relativement importantes et, quand on supprime seulement le courant du moteur, il peut se faire que l'arrêt ne soit pas assez rapide et précis pour le travail exécuté. Un dispositif de freinage est utile.

On laisse descendre par leur propre poids les charges que l'on soulève avec des engins de levage tels que grues et ponts-roulants. Ce mouvement de descente s'accélérerait s'il était libre et sa vitesse deviendrait dangereuse. Il est nécessaire de le freiner.

De même la vitesse des véhicules électriques, tramways et camions, qui descendent des pentes rapides et longues, deviendrait trop grande si les voitures n'étaient pas convenablement freinées.

+
1
Ind. shunt
Induit
Résist. de démarrage
5
2
3
4
1
-

Fig. 1. — Schéma d'équipement automatique d'un moteur shunt. Au démarrage, fermetures successives par contacteurs des coupures 1, 2, 3, 4. A l'arrêt, ouvertures simultanées des coupures 1, 2, 3, 4, puis freinage rhéostatique par fermeture par un contacteur de la coupure 5.

2. Les modes de freinage sont nombreux.

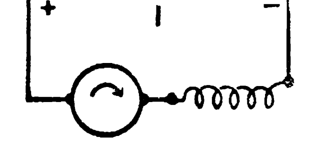
Le plus simple est le *freinage mécanique*. Un sabot ou une bande d'acier sont appliqués sur un tambour solidaire des organes en mouvement et le ralentissent par l'effet du frottement. Un tel frein s'échauffe beaucoup et ne peut fonctionner que par périodes courtes. C'est surtout un *frein d'arrêt*. La commande en est manuelle ou électrique. Par exemple, dans les engins de levage, la bande du frein est énergiquement appliquée sur son tambour par un fort ressort. On débloque le frein à l'aide d'un électro-aimant à avalement. Le frein entre donc en action quand le courant est coupé : c'est un dispositif de sécurité. On reproche aux freins mécaniques d'être parfois brutaux.

On peut freiner un moteur électrique en l'alimentant par un courant qui tend à renverser son sens de rotation. C'est le *freinage à contre-courant* qui ralentit le mouvement et l'arrête.

Le *freinage rhéostatique* consiste à faire fonctionner le moteur en génératrice débitant dans une résistance de freinage. Le plus souvent on conserve

l'excitation du moteur soit en totalité soit en partie et la génératrice tourne à excitation séparée, mais on peut aussi la faire fonctionner avec auto-excitation.

Dans le cas d'auto-excitation, les connexions de l'induit et de l'inducteur doivent être telles que la génératrice puisse s'amorcer. Après la marche en moteur, l'inducteur conserve une aimantation rémanente; pour qu'il y ait amorçage, il faut que le courant produit par la génératrice renforce le flux rémanent : le sens du courant dans l'inducteur doit donc rester le même dans les deux modes de fonctionnement.



La figure 1 donne le schéma du freinage rhéostatique sans coupure de l'excitation dans le cas d'une machine shunt.

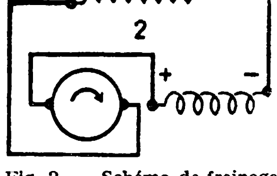


Fig. 2. — Schéma de freinage rhéostatique, avec auto-excitation d'un moteur série.
1. Marche normale.
2. Freinage pour le même sens de rotation.

La figure 2 représente le freinage avec auto-excitation d'une machine série.

Assez rarement, quand le mouvement freiné dure longtemps, il peut y avoir avantage à renvoyer le courant produit par le freinage dans la ligne d'alimentation : c'est le *freinage en récupération.*

Le freinage rhéostatique et le freinage en récupération sont des freinages de ralentissement et non d'arrêt.

Lorsque la tension d'alimentation manque accidentellement, le freinage avec excitation séparée ne fonctionne pas, parfois une dynamo à excitation séparée ne s'amorce pas par exemple à cause d'un mauvais contact dans le circuit de l'induit, il est donc prudent, dans les installa tions où la défaillance d'un frein électrique serait dangereuse, de doubler ce frein par un frein mécanique.

3. Calcul de la résistance de freinage rhéostatique d'une machine shunt.

Un monte-charge est commandé par un moteur excité en dérivation qui absorbe 4 *kW dans l'induit sous* 110 V. *pour lever la charge maximum à une vitesse de* 30 *m/mn. A la descente de cette même charge, on laisse l'inducteur de la dynamo branché sur* 110 V. *et on ferme l'induit sur une résistance* x. *Cherchons quelle doit être la valeur de cette résistance pour que la vitesse à la descente soit* 25 *m/mn. La résistance de l'induit est* 0,20 Ω. *Nous admettrons que le rendement de la machine shunt avec son réducteur de vitesse est* 0,60 *à la descente comme à la montée.*

A la montée, la puissance transmise du moteur au câble de la cage est P = 4 000 × 0,60 = 2 400 watts. La puissance résistante de la cage qui s'élève a la même valeur (mouvement uniforme).
Le moteur absorbe un courant :

$$I = 4\,000 : 110 = 36{,}4\ A$$

Sa f. c. é. m. est :

$$E = U - RI = 110 - (36{,}4 \times 0{,}20) = 102{,}72\ V.$$

La vitesse de levée de la charge et la vitesse n de rotation du moteur sont évidemment proportionnelles et nous pouvons écrire

$$n = k \times 30\ tr/mn.$$

k étant un facteur constant qui caractérise le dispositif mécanique de démultiplication du moteur à la cage.

A la descente, la puissance de la charge devient motrice, elle est proportionnelle à la vitesse du mouvement. De 2 400 *W* à 30 *m/mn*, elle devient à 25 *m/mn* :

$$2\,400 \times \frac{25}{30} = 2\,000\ W.$$

Elle est transmise à la dynamo qui tourne en génératrice et on la retrouve aux bornes, compte tenu du rendement. La génératrice débite donc :

$$2\,000 \times 0{,}60 = 1\,200\ W$$

Sa vitesse est $n' = k \times 25\ tr/mn.$

L'excitation est restée celle du moteur, la f. é. m. E_1 a pour valeur :

$$E_1 = E \times \frac{n'}{n} = 102{,}72 \times \frac{25}{30} = 85{,}6\ V.$$

Soit I_1, le courant débité, la tension U_1 aux bornes de la machine est

$$U_1 = E_1 - RI_1 = 85{,}6 - 0{,}20\ I_1$$

ce qui donne pour la puissance débitée dans la résistance extérieure :

$$U_1\,I_1 = 85{,}6 . I_1 - 0{,}20 . I^2_1.$$

Or cette puissance doit être 1 200 *W*, d'où l'équation :

$$0{,}20 . I_1^2 - 85{,}6 . I_1 + 1\,200 = 0$$

ou

$$I_1^2 - 428\ I_1 + 6\,000 = 0$$

qui donne deux valeurs de I_1, soit 14,5 *A*, soit 413,5 *A*.

La seconde est à écarter, l'induit de la machine ne supporterait pas un tel courant.

Pour $I_1 = 14,5$ A, la tension aux bornes de la génératrice est

$$U_1 = E_1 - R\ I_1 = 85,6 - 0,20 \times 14,5 = 82,7\ V.$$

et la résistance x dans laquelle passe le courant I_1 est déterminée :

$$x = U_1 : I_1 = 82,7 : 14,5 = 5,7\ \Omega.$$

4. Calcul de la résistance de freinage d'une machine-série avec auto-excitation.

Un camion électrique à accumulateurs pesant 5 tonnes *est équipé de deux moteurs série, montés en parallèle, alimentés à* 80 *volts. Le diamètre des roues motrices mesure* 0,85 m. *La démultiplication des moteurs aux roues est* 1 : 6 *avec un rendement de* 0,80. *La résistance de l'induit d'un moteur est* 0,08 Ω, *celle de l'inducteur* 0,06 Ω. *Le rendement et la vitesse d'un moteur en fonction du courant absorbé sont donnés par le tableau suivant;*

I.......	10	20	30	40	50	60	70 *A*
n	1 290	735	600	520	480	450	444 *tr/mn.*
η	0,62	0,78	0,81	0,83	0,835	0,83	0,81

En palier, le camion fait 15 kilomètres à l'heure. *Il aborde une descente dont la pente est* 0,06, *le conducteur freine en faisant fonctionner les machines-série en génératrices auto-excitées débitant chacune sur une résistance* x. *Déterminons cette résistance pour que la vitesse de descente soit* 15 km/h.

Traçons la caractéristique de vitesse $n = f$ (I) et la courbe du rendement $\eta = F$ (I) de l'un des moteurs.

Marche du camion en palier.

Le camion parcourt en une minute :

$$15\,000 : 90 = 250\ m.$$

et les roues font $250 : (\pi \times 0,85) = 93,6$ *tours.*

La vitesse correspondante du moteur est :

$$93,6 \times 6 = 562\ tr/mn.$$

La caractéristique de vitesse indique que l'intensité dans chaque moteur est alors 33,5 *A*. La puissance absorbée par chaque moteur est :

$$UI = 80 \times 33,5 = 2\,680\ watts$$

et pour les deux $2\,680 \times 2 = 5\,360$ *watts.*

Quand le courant est 33,5 *A*, d'après la courbe du rendement, $\eta = 0{,}82$. La puissance sur les arbres des moteurs atteint

$$5\,360 \times 0{,}82 = 4\,395 \text{ watts},$$

après démultiplication, elle se réduit à

$$4\,395 \times 0{,}80 = 3\,516 \text{ watts}$$

à la jante des roues.

La vitesse du camion reste constante, c'est donc que cette puissance de traction est équilibrée. Elle l'est par la puissance résistante due au roulement sur la route et à la résistance de l'air.

Marche du camion dans la descente.

Sur une pente descendante de 0,06, la composante parallèle à la route du poids du véhicule est

$$F = 5\,000 \times 0{,}06 = 300 \text{ kgf}.$$

C'est une force de traction. Puisque le camion se déplace de 250 : 60 = 4,166 *m/s*, cette force produit une puissance de

$$300 \times 4{,}166 = 1\,250 \text{ kgm/s. ou } 9{,}81 \times 1\,250 = 12\,262 \text{ watts}.$$

Une partie fournit la puissance résistante au mouvement du camion que nous avons vue être 3 516 *watts* à 15 *km/h*.

Restent 12 262 — 3 516 = 8 746 *watts*, réduits, à cause des pertes dans les organes de démultiplication, à 8 746 × 0,80 = 7 000 *watts* qui parviennent aux arbres des machines série, soit 3 500 *watts* par machine.

Ces génératrices tournent à 562 *tr/mn*. Il nous faut déterminer leur tension aux bornes et l'intensité qu'elles fournissent.

Il est possible d'obtenir, à partir de la caractéristique de vitesse, la caractéristique à vide de l'une de ces génératrices tournant à 562 *tr/mn*. Indiquons comment on en détermine un point, pour l'intensité I = 20 *A* par exemple.

Quand l'inducteur et l'induit sont parcourus par un courant de 20 *A* la caractéristique de vitesse du moteur indique que la machine tourne à 735 *tr/mn* quand la tension à ses bornes est 80 *V*. La f. c. é. m. est alors

$$E' = U - (R + R')\,I = 80 - 0{,}14 \times 20 = 77{,}2 \text{ V}.$$

Pour le même courant inducteur, cette f. c. é. m. est proportionnelle à la vitesse, donc à 562 *tr/mn* la génératrice donne :

$$E = 77{,}2 \times \frac{562}{735} = 59{,}1 \text{ V}.$$

Connaissant E et I nous pouvons calculer :

1° la tension aux bornes : $U = E - (R + R')\,I$,

2° la puissance débitée : UI,

3° la puissance absorbée : $P = UI\eta$, en admettant que le rendement de la génératrice est égal à celui du moteur pour une même intensité I dans la machine.

En effectuant ces calculs pour plusieurs valeurs de I, nous avons trouvé :

I	n	E′	E à 562 tr/mn	U	UI	P
20 A	735 tr/mn	77,2 V	59,1 V	56,2 V	1 125 W	1 445 W
30	600	75,8	72,3	68	2 040	2 540
35	550	75,1	77,0	72,1	2 523	3 060
40	520	74,4	80,6	75	3 000	3 620

Traçons la courbe $P = f(I)$. Le point de cette courbe ayant pour ordonnée P = 3 500 a pour abscisse I = 38,8.

En recommençant les calculs précédents pour un courant de 38,8 *A*, nous trouvons que la tension aux bornes est U = 74,6 *V*.

La résistance branchée aux bornes d'une génératrice doit donc être

$$x = U : I = 74{,}6 : 38{,}8 \simeq 1{,}9\ \Omega.$$

Bien des facteurs de la détermination de cette valeur sont obtenus graphiquement, l'approximation finale ne peut être que grossière, elle est d'ailleurs suffisante en l'espèce.

Remarquons que, pour la même polarité des inducteurs, le courant dans l'induit change de sens dans la marche en génératrice, il faudra donc croiser les connexions comme l'indique la figure 2.

Exercices.

1. Le schéma d'un treuil électrique est donné par la figure 3. Le rendement du train d'engrenages est 0,70.

Le moteur de commande est une machine série 600 *V*, 100 *A*, mais la tension dont on dispose pour l'alimenter est seulement 550 *V*.

Dans le dossier de la machine, on trouve les renseignements suivants :

a) Mesures effectuées pour obtenir la caractéristique à vide de la dynamo marchant en génératrice, à excitation indépendante, à la vitesse constante de 500 *tr/mn*.

excitation	25	50	75	100 ampères
f. é. m.	360	585	685	750 volts

b) Rendement du moteur en fonctions du courant absorbé sous 600 *V* :

I	10	25	50	100 ampères
η	0,52	0,79	0,86	0,83

c) Résistances à 60° de l'induit : 0,12 Ω, de l'inducteur : 0,08.
Avec ces données :

1° construire la caractéristique de vitesse, $n = f\ (I)$, du moteur alimenté à 550 *V* :

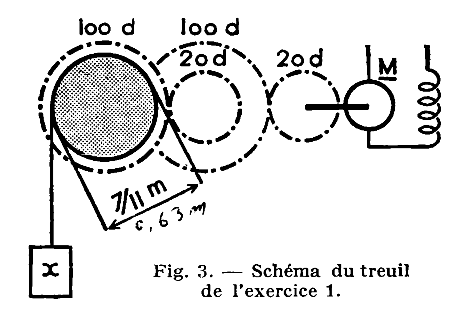


Fig. 3. — Schéma du treuil de l'exercice 1.

2° déterminer la vitesse de rotation du moteur donnant à la charge en montée une vitesse de 0,50 *m/s*;

3° calculer la charge x soulevée dans ces conditions;

4° quand cette même charge descend, la machine-série fonctionne en génératrice auto-excitée; chercher la résistance sur laquelle il faut brancher la génératrice pour que le mouvement soit uniforme à raison de 2 *m* en 3 *s*.

2. Une dynamo à excitation indépendante a donné à vide, à 1 000 *tr/mn*, en faisant varier l'excitation i :

i	0,25	0,50	0,80	1,00	1,40	1,70	2,00 *A*
E	50	94	122	133	144	151	155 *V.*

La résistance du circuit inducteur est 113 Ω, celle de l'induit 0,50 Ω.

1° On branche l'inducteur aux bornes de l'induit sans rhéostat de champ, on obtient ainsi une dynamo excitée en dérivation que l'on fait tourner, à vitesse croissante à vide.
Déterminer la courbe de la f. é. m. en fonction de la vitesse, $E = f\ (n)$.
Trouver la f. é. m. à vide que donne la génératrice à la vitesse de 900 *tr/mn.*
Tracer la caractéristique en charge $U = \varphi\ (I)$ à cette vitesse en admettant que la réaction magnétique de l'induit est négligeable.

2° La vitesse de la dynamo est maintenue à 900 *tr/mn.* On fait débiter à la génératrice un courant de 15 *A* dans des résistances, calculer la puissance qu'elle absorbe sur son arbre, sachant que son rendement est 0,75.

4. TRANSFORMATEURS ET ALTERNATEURS

20e LEÇON

Étude expérimentale d'un transformateur monophasé.

I. Description d'un transformateur monophasé.

Un transformateur monophasé se compose d'une *carcasse magnétique* et de deux *enroulements*.

Le *circuit magnétique* fermé, en tôles minces pour réduire les pertes par courants de Foucault, est fait de deux noyaux réunis par des traverses.

Les deux *enroulements* sont constitués par des bobines et répartis chacun sur les deux noyaux. Dans les figures représentant schématiquement un transformateur (fig. 1), on indique un enroulement sur un noyau et l'autre enroulement sur l'autre noyau. Cette séparation n'est jamais réalisée dans les transformateurs industriels.

L'un des enroulements est connecté au *générateur* de courant alternatif : on le nomme *primaire*; l'autre fournit de l'énergie à un réseau récepteur : c'est le *secondaire*.

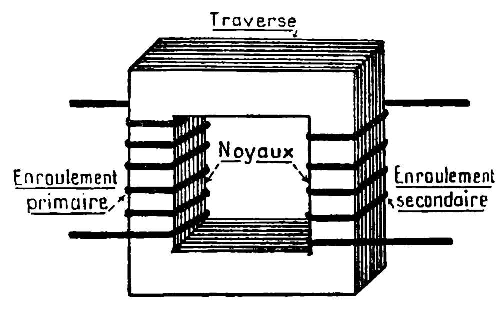


Fig. 1. — Constitution d'un transformateur (figure très simplifiée).

Les deux enroulements

ont, en général, des nombres de spires différents. A celui qui en possède le moins, on donne le nom d'*enroulement basse tension* (BT); à l'autre, le nom d'*enroulement haute tension* (HT).

L'enroulement basse tension peut être le primaire ou le secondaire du transformateur suivant les conditions d'emploi et l'installation de l'appareil.

2. Transformateur démontable pour expérience des cours.

Nous utiliserons dans cette leçon un petit transformateur construit spécialement pour que l'on puisse changer facilement les enroulements.

Le circuit magnétique comporte deux noyaux feuilletés (40 × 40 × 130), assemblés à une culasse également feuilletée (40 × 40 × 130). Une traverse feuilletée, serrée sur les noyaux par deux boulons, complète le circuit magnétique.

Nous disposons d'un jeu de bobines ayant différents nombres de spires. Nous en plaçons une sur un noyau, une seconde sur l'autre noyau : primaire et secondaire sont ainsi séparés.

Indiquons, pour éviter toute idée fausse, que cet appareil scolaire diffère d'un transformateur industriel par la mauvaise exécution des joints magnétiques et la disposition des deux enroulements sur des régions différentes du circuit magnétique.

3. Fonctionnement du transformateur à vide, c'est-à-dire à circuit secondaire ouvert.

Expériences. — Le primaire est une bobine de 600 spires, le secondaire, successivement une bobine de 600 spires, 120 spires, 6 spires. Un voltmètre et un ampèremètre sont montés sur le primaire, un voltmètre aux bornes du secondaire (fig. 2). Désignons par U_1 la tension primaire, par I_v le courant primaire, par U_2 la tension secondaire.

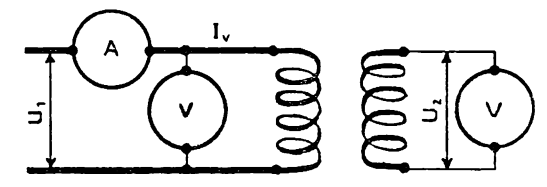


Fig. 2. — Montage pour l'étude d'un transformateur à vide. — Remarquer le mode de représentation conventionnelle d'un transformateur.

Trois séries d'expériences ont donné les résultats suivants :

a) *Primaire :* $n_1 = 600$ *spires; secondaire :* $n_2 = 600$ *spires.*

$U_1 = 115$ *V*,	50 *p/s*,	$I_v = 0{,}2$ *A*,	$U_2 = 115$ *V*
$U_1 = 200$ *V*,	50 *p/s*,	$I_v = 0{,}5$ *A*,	$U_2 = 200$ *V*
$U_1 = 115$ *V*,	25 *p/s*,	$I_v = 0{,}55$ *A*,	$U_2 = 115$ *V*

b) Primaire : $n_1 = 600$ *spires; secondaire :* $n_2 = 120$ *spires.*

$U_1 = 115$ *V*,	50 *p/s*,	$I_p = 0,2$ *A*,	$U_2 = 23$ *V*
$U_1 = 200$ *V*,	50 *p/s*,	$I_p = 0,5$ *A*,	$U_2 = 40$ *V*
$U_1 = 115$ *V*,	25 *p/s*,	$I_p = 0,55$ *A*,	$U_2 = 23$ *V*

c) Primaire : $n_1 = 600$ spires; *secondaire :* $n_2 = 6$ *spires.*

$U_1 = 115$ *V*,	50 *p/s*,	$I_p = 0,2$ *A*,	$U_2 = 1,15$ *V*
$U_1 = 200$ *V*,	50 *p/s*,	$I_p = 0,5$ *A*,	$U_2 = 2$ *V*
$U_1 = 115$ *V*,	25 *p/s*,	$I_p = 0,55$ *A*,	$U_2 = 1,1$ *V*

Dans une quatrième série d'expériences, **nous remplaçons la bobine** primaire par une bobine de 1 200 spires :

d) Primaire : $n_1 = 1\,200$ *spires; secondaire :* $n_2 = 600$ *spires.*

$U_1 = 200$ *V*,	50 *p/s*,	$I_p = 0,1$	$U_2 = 100$ *V*

Conclusions. — 1° La bobine primaire de 600 spires n'a qu'une résistance de 2,5 Ω. L'intensité qu'elle absorbe est bien inférieure à celle qui correspond à la loi d'Ohm.

Le transformateur, quand le secondaire est ouvert, fonctionne comme une bobine de self.

2° Pour toutes les mesures effectuées, calculons d'une part le rapport $\frac{U_1}{U_2}$ des tensions primaire et secondaire, d'autre part le rapport $\frac{n_1}{n_2}$ des nombres de spires des deux enroulements; **ces deux rapports sont égaux dans tous les cas :**

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}} \qquad (1)$$

Le rapport $\frac{n_1}{n_2}$ **est dit** *rapport de transformation* **du transformateur.**

Remarque. — Recommençons l'une des expériences précédentes en plaçant des cales en bois à l'extrémité des noyaux sous la traverse supérieure du transformateur pour créer deux entrefers importants dans le circuit magnétique.

Sans entrefer, pour $V_1 = 115$ V, $n_1 = 600$ spires, $n_2 = 120$ spires, nous avons obtenu $U_2 = 23$ V. Avec deux entrefers, nous trouvons $U_2 = 15$ volts.

La formule (1) ne s'applique plus. Elle n'est valable que pour un circuit magnétique sans entrefers; en d'autres termes, pour un couplage magnétique parfait entre enroulements primaire et secondaire.

4. Avec un transformateur, on peut obtenir de hautes tensions.

La formule (1) s'écrit aussi :

$$U_2 = U_1 \times \frac{n_2}{n_1}.$$

Il est possible de donner telle valeur que l'on veut au rapport $n_2 : n_1$ lors de la construction d'un transformateur : non pas en modifiant n_1, car *le nombre de spires au primaire dépend de la tension* U_1 ainsi que nous le verrons dans la leçon qui suit, mais en donnant à n_2 une valeur convenable. On construit ainsi des transformateurs qui abaissent la tension ou des transformateurs qui l'élèvent.

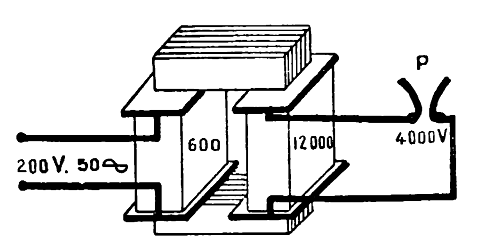


Fig. 3. — Production d'une tension de 4 000 V. Un arc se produit entre les cornes du parafoudre P.

Par exemple si $n_1 = 600$ spires et $n_2 = 12\,000$ spires, la tension secondaire est vingt fois plus grande que la tension primaire : quand $U_1 = 200$ volts, $U_2 = 4\,000$ volts.

Pour montrer la haute tension ainsi obtenue nous connectons aux bornes du secondaire un parafoudre à cornes (fig. 3). Les cornes, qui sont deux fils de zinc, sont très voisines à leur partie inférieure. Un arc jaillit entre elles, monte le long des cornes, s'éteint quand il est très long pour s'allumer à nouveau à la partie inférieure[1].

5. Fonctionnement d'un transformateur en charge.

Expériences. — Nous employons un petit transformateur industriel de 1 200 *VA*, 200 *V*, 50 *p/s*, ayant 600 spires au primaire et 200 au secondaire. Le secondaire débite dans un rhéostat sans self (fig. 4).

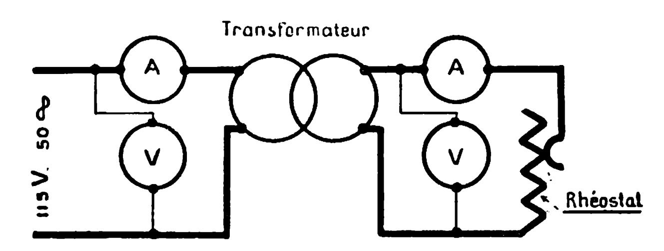


Fig. 4. — Montage pour l'étude d'un transformateur en charge. Remarquer un mode de représentation conventionnelle d'un transformateur.

A vide, pour $U_1 = 205$ *V* au primaire, le transformateur absorbe $I_v = 2A$ et fournit $U_2 = 67{,}5$ *V* au secondaire.

1. **Cette expérience nécessite des précautions, car la tension de 4 000 volts est très dangereuse.**

A mesure que l'on augmente le débit du secondaire, l'intensité absorbée par le primaire croît.

A pleine charge, pour $U_1 = 205$ *V* au primaire, l'appareil absorbe $I_1 = 7$ *A* et fournit au récepteur alimenté par le secondaire $I_2 = 19,5$ *A* sous la tension $U_2 = 62$ volts.

Conclusions. — 1° Le rapport de transformation à vide est 3. En charge, la tension secondaire a diminué de 67,5 — 62 = 5,5 *V*, soit de 8 %.

2° En charge, le nombre des ampères-tours primaires est 7 × 600 = 4 200, celui des ampères-tours secondaires est 19,5 × 200 = 3 900. Ces deux nombres ne diffèrent que de 7 pour cent.

Ils différeraient relativement moins encore si le transformateur était plus puissant. Les gros transformateurs ont, en effet, un rendement qui atteint et même dépasse 0,98. On peut admettre que la puissance primaire et la puissance secondaire sont égales, soit dans le cas d'un secondaire sans self que :

$$U_1 I_1 \simeq U_2 I_2.$$

En négligeant la chute de tension secondaire

$$\frac{U_1}{U_2} \simeq \frac{n_1}{n_2}$$

d'où

$$\boxed{n_1 I_1 \simeq n_2 I_2.}$$

Quand un transformateur fonctionne au voisinage de sa charge normale, le nombre des ampères-tours primaires est approximativement égal au nombre des ampères-tours secondaires.

6. Avec un transformateur ayant peu de spires au secondaire, on peut obtenir un courant secondaire très intense.

1re Expérience. — Avec un petit transformateur pour braser les lames de scies à ruban, ayant 400 spires au primaire et 6 spires au secondaire, alimenté sous 115 volts, nous fondons une lame d'acier de 25 mm² de section. L'intensité secondaire dépasse 700 ampères.

2e Expérience. — En connectant aux bornes du secondaire de 6 spires une pince à souder (fig. 5), il suffit de serrer quelques instants deux

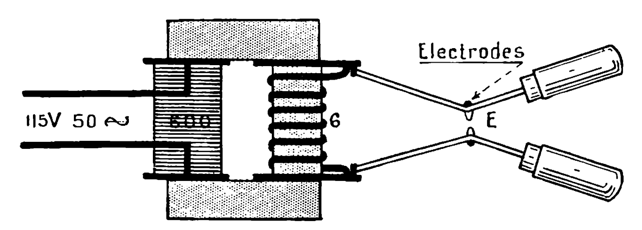


Fig. 5. — ***Pince à souder.*** On serre deux tôles fines entre les électrodes E. Le courant secondaire est théoriquement 100 fois plus intense que le courant primaire. Pourquoi?

tôles d'acier minces (0,1 *mm*), entre les électrodes de la pince pour les souder au point de contact.

Cette expérience montre en quoi consiste la soudure électrique par points.

Expériences. — Le secondaire d'un petit transformateur est constitué par une seule spire faite d'un anneau de cuivre creusé en rigole. En quelques secondes, la température du cuivre est assez élevée pour fondre du plomb ou de l'étain (fig. 6).

C'est le principe des fours industriels à induction.

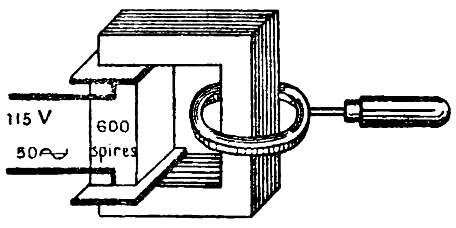


Fig. 6. — Fusion de plomb dans une spire en cuivre, en forme de rigole circulaire constituant le secondaire d'un transformateur dont le primaire a un grand nombre de spires.

7. Conclusion.

Les transformateurs ne comportent aucune partie tournante. Ce sont des machines statiques simples et robustes.

Ils permettent de modifier facilement les facteurs tension et intensité de la puissance électrique fournie par un courant alternatif. Il n'y a pas d'appareil analogue dans le matériel à courant continu.

On fabrique des transformateurs de tailles fort différentes, depuis 8 ou 10 *VA* pour actionner des sonneries d'appartement, jusqu'à 70 000 *kVA* pour être employés dans de grandes centrales électriques.

Exercices.

1. On dispose de courant *continu* sous la tension de 115 volts. Comment obtenir une tension de 4 volts? Comment obtenir une tension de 500 volts?

2. Un petit transformateur destiné au brasage des scies possède au primaire 480 spires avec prises à la 400e spire et à la 320e. La tension primaire est 155 volts. De quelles tensions dispose-t-on au secondaire? Il y a 6 spires au secondaire.
L'intensité primaire peut atteindre 10 ampères. Quelle est l'intensité maximum au secondaire?

3. Avec le transformateur démontable décrit dans la leçon, on veut alimenter une lampe à ruban de tungstène de 100 W, 6 V, en utilisant au primaire une bobine de 600 spires et une tension de 115 volts. Quel doit être le nombre de spires de la bobine secondaire?

4. Pour déterminer le nombre de spires des enroulements d'un transformateur 115-440 volts, on alimente le primaire sous une tension alternative de 115 V et l'on enroule 10 spires de fil sur la carcasse magnétique de l'appareil. La tension entre les extrémités des 10 spires est 2,5 V. Quel est le nombre de spires de chaque enroulement?

5. Démontrer qu'à densité de courant égale dans les deux enroulements d'un transformateur, le poids du cuivre primaire est égal au poids du cuivre secondaire. On admettra qu'une spire primaire a la même longueur qu'une spire secondaire.

Théorie élémentaire d'un transformateur monophasé.

I. TRANSFORMATEUR A VIDE

Une tension alternative appliquée aux bornes du primaire produit un courant alternatif dans l'enroulement primaire. Ce courant engendre un flux alternatif dans le circuit magnétique. Les variations de ce flux produisent une f. é. m. alternative dans toutes les spires, tant secondaires que primaires, enroulées autour des noyaux du transformateur.

Nous allons préciser quantitativement cette explication sommaire.

Nous supposerons le transformateur sans pertes ni fuites magnétiques, c'est-à-dire que nous négligerons les pertes par effet Joule, par hystérésis et courants de Foucault et nous admettrons que chaque spire, primaire ou secondaire, est traversée par le même flux.

1. Calcul de la f. é. m. induite dans une spire entourant un noyau du transformateur.

Soit U_1 la tension sinusoïdale appliquée aux bornes du primaire. A l'instant t, cette tension a pour valeur :

$$u_1 = U_m \sin \omega t.$$

L'enroulement primaire est une bobine à noyau de fer, donc de grande self-induction; l'intensité du courant qui y circule est en quadrature arrière avec la tension :

$$i_1 = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

ou

$$i_1 = - I_m \cos \omega t.$$

Tant que le circuit magnétique est loin de la saturation, et c'est le cas dans les transformateurs, *le flux magnétique produit est sensiblement proportionnel à l'intensité du courant;* de plus, *il est en phase avec le courant.* Donc, à l'instant t, le flux dans le circuit magnétique a pour valeur :

$$\varphi = - \Phi_m \cos \omega t$$

Φ_m étant la valeur maximum du flux.

Ce flux variable induit, dans une spire qu'il traverse, une f. é. m. que

l'on sait égale à la dérivée par rapport au temps, changée de signe, de la fonction Φ :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ volts.}$$

La dérivée de Φ par rapport à t est : $\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi_m \sin\omega t$.

La f. é. m. induite dans 1 spire à l'instant t a donc pour valeur :

$$e = -\omega\Phi_m \sin\omega t \text{ volts.}$$

Cette f. é. m. est *sinusoïdale* et de *même fréquence que la tension primaire, mais en opposition de phase avec cette tension.*

La valeur maximum de cette f. é. m. est : $E_m = \omega\Phi_m$ *volts* et sa valeur efficace

$$E = \frac{\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} \text{ volts} = \frac{\omega s B_m}{\sqrt{2}} \text{ volts.}$$

En remplaçant par ω sa valeur $2\pi f$ et en effectuant le quotient $2\pi : \sqrt{2}$:

$$\boxed{E = 4{,}44 . f . s . B_m . \text{ volts.}}$$

Pour la fréquence standard 50 *hertz* un noyau de section $s = 100\ cm^2$, une induction maximum $B_m = 1$ *weber par* m^2 la f. é. m. produite dans *une spire* a pour valeur :

$$E = 4{,}44 \times 50 \times 10^{-2} \times 1 = 2{,}22 \text{ volts.} \qquad (1)$$

2. Calcul du rapport théorique de transformation.

Dans une spire du primaire, la f. é. m. induite par le flux du noyau est opposée à la tension primaire : *c'est une force contre-électromotrice.*

Dans une spire de l'enroulement secondaire, c'est *une force électromotrice,* car c'est elle qui, s'ajoutant aux f. é. m. induites dans les autres spires du secondaire, crée la tension aux bornes de cet enroulement.

La f. é. m. E_1 dans l'enroulement primaire de n_1 spires en série est

$$E_1 = n_1 E.$$

Dans l'enroulement secondaire de n_2 spires, la f. é. m. E_2 est :

$$E_2 = n_2 E.$$

Le rapport des deux forces électromotrices

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

est *le rapport théorique de transformation.*

3. Le nombre de spires primaires, pour une fréquence donnée, est déterminé par la tension primaire, la section du noyau et l'induction maximum admise dans le fer.

La tension primaire U_1 est équilibrée par la résultante de la chute ohmique due au courant à vide et de la f. é. m. dans l'enroulement; donc, *en négligeant la chute ohmique* (puisque nous négligeons les pertes) :

$$U_1 = E_1 = n_1 E, \qquad \text{d'où} \qquad n_1 = \frac{U_1}{E}.$$

Le nombre de spires au primaire est égal au quotient de la tension primaire par la f. é. m. produite dans une spire.

1er *Exemple. — Un transformateur construit pour* 110 *volts au primaire, fréquence* $f = 50$ *Hz, section du noyau* $s = 100$ *cm*², *induction maximum* $B_m = 1$ *Wb/m*², *possède au primaire :*

$$n_1 = \frac{110}{2{,}22} \simeq 50 \text{ spires.}$$

2e *Exemple.* — Pour que le transformateur démontable employé dans la leçon précédente convienne pour 200 *V*, 50 *Hz*, section 16 *cm*², induction maximum 0,6 *Wb/m*², il faut au primaire un nombre de spires :

$$n_1 = \frac{200}{4{,}44 \times 50 \times 16 \times 10^{-4} \times 0{,}6} = 943 \text{ spires.}$$

4. Intensité à vide.

Cette intensité a pour composantes l'intensité réactive qui produit le flux magnétique et l'intensité active qui correspond aux pertes dans le cuivre et dans le fer. On néglige les pertes : l'intensité à vide I_v est donc réactive et en quadrature arrière avec la tension U_v. On la désigne par I_v; *le nombre d'ampères-tours magnétisants est* $n_1 I_v$.

Quand le circuit magnétique est bien construit, avec des joints soignés, l'intensité à vide est faible, de l'ordre du vingtième de l'intensité en charge.

5. Diagramme de fonctionnement du transformateur à vide.

Prenons comme origine des phases la phase de la tension primaire U_1. Cette tension est représentée par le vecteur OA (fig. 1).

Le courant à vide est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de U_1 : le vecteur OC représente I_v.

La tension U_2, en opposition avec U_1, est figurée par **le vecteur** $\overline{OB}$.

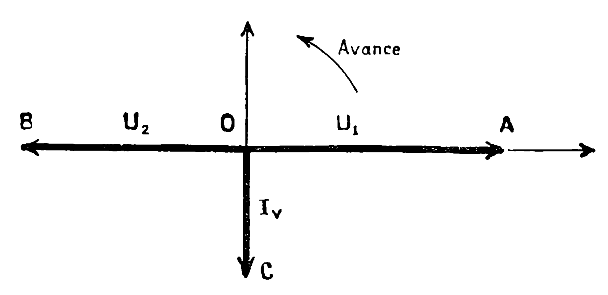


Fig. 1. — Diagramme d'un transformateur à vide. La tension primaire U_1 et la tension secondaire U_2 sont en opposition de phase. I_v est le courant à vide.

II. TRANSFORMATEUR EN CHARGE

6. L'induction maximum est à peu près la même en charge qu'à vide.

Nous avons constaté expérimentalement que l'intensité I_1 dans le primaire croît à mesure que le secondaire débite une intensité plus grande. La tension primaire U_1 est équilibrée par la résultante de la chute ohmique R_1I_1 et de la f. c. é. m. E_1; donc, en négligeant la chute ohmique toujours très faible :

$$U_1 = E_1.$$

Le transformateur étant alimenté à tension U_1 constante, E_1 a toujours la même valeur; le flux qui produit cette f. c. é. m. varie donc toujours entre les mêmes valeurs extrêmes, que le secondaire débite ou non du courant : *un transformateur alimenté à tension constante fonctionne à flux maximum constant.*

Il en résulte que *le nombre d'ampères-tours magnétisants* n_1I_v qui produisent ce flux *est aussi constant.*

7. Un transformateur est auto-régulateur.

Quand le secondaire fournit du courant à un récepteur, ce courant tend à produire dans le circuit magnétique du transformateur un flux de sens contraire au flux primaire (loi de Lenz); et, par conséquent, le courant secondaire tend à diminuer le flux résultant, donc à diminuer

la f. c. é. m. E_1 opposée à la tension primaire. Le courant primaire croît donc et rétablit le flux sensiblement a sa valeur primitive.

En somme, parce que les ampères-tours magnétisants, qui sont constants, sont la résultante des ampères-tours primaires et des ampères-tours secondaires, *toute variation des ampères-tours secondaires entraîne une variation de même sens des ampères-tours primaires.*

On donne à cette propriété le nom d'auto-régulation du transformateur.

8. Diagramme de fonctionnement d'un transformateur en charge.

C'est la traduction graphique de la propriété énoncée ci-dessus.

Les ampères-tours magnétisants, $n_1 I_v$, sont la résultante des ampères-

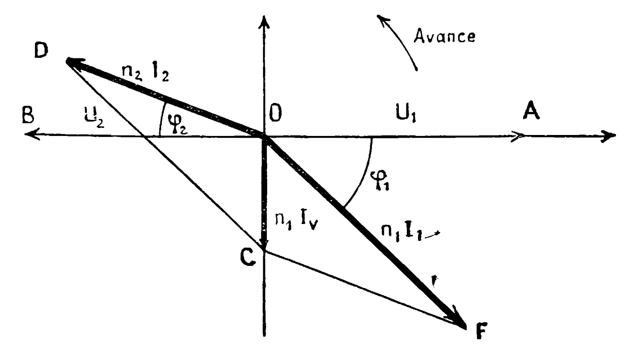


Fig. 2. — Diagramme d'un transformateur en charge. Les ampères-tours magnétisants n_1I_v sont la résultante des ampères-tours primaires n_1I_1 et des ampères-tours secondaires n_2I_2.

tours secondaires, n_2I_2, et des ampères-tours primaires, n_1I_1, (fig. 2).

L'intensité secondaire I_2 est déphasée de l'angle φ_2 en arrière de la tension secondaire U_2; l'intensité primaire I_1, de l'angle φ_1 en arrière de U_1.

Remarquons que φ_1 est supérieure à φ_2. En effet, le primaire fournit non seulement la puissance active et réactive du secondaire, mais encore la puissance réactive pour l'aimantation du circuit magnétique du transformateur.

9. Influence des pertes par effet Joule : elles diminuent la tension secondaire et sont proportionnelles au carré de la puissance mise en jeu dans le transformateur.

Ces pertes sont $R_1I_1^2$ dans le primaire, $R_2I_2^2$ dans le secondaire.

a) Un transformateur est, très généralement, alimenté à tension constante U_1. Par suite de l'existence d'une chute ohmique de tension

R_1I_1 dans le primaire, la f. c. é. m. primaire E_1 est inférieure à la tension U_1.

Par suite de l'existence d'une chute ohmique secondaire R_2I_2, la tension aux bornes secondaires U_2 est inférieure à la force électromotrice secondaire E_2. Mais :

$$E_2 = E_1 \times \frac{n_2}{n_1}.$$

On voit donc que si I_2 et corrélativement I_1 croissent, alors que U_1 est constant, U_2 diminue.

La diminution de tension secondaire, quand on passe du fonctionnement à vide au fonctionnement à pleine charge, ne dépasse pas 5 pour cent dans les bons transformateurs.

b) En remarquant que la tension primaire est constante et que la tension secondaire l'est presque, on peut admettre que I_1 et I_2 sont proportionnels à la puissance P fournie par le transformateur : *les pertes dans le cuivre sont donc proportionnelles au carré de la puissance :*

$$R_1I_1^2 + R_2I_2^2 \simeq kP^2$$

k étant un coefficient constant.

10. Pertes dans le fer.

Ces pertes par hystérésis et courants de Foucault sont fonctions de l'induction maximum et de la fréquence. Or, un transformateur fonctionne à induction maximum constante et à fréquence invariable : *les pertes dans le fer sont donc constantes.*

On les évalue en mesurant au wattmètre la puissance absorbée par le transformateur à vide sous tension normale et en déduisant de cette puissance les pertes en chaleur Joule, d'ailleurs très faibles.

11. Influence des fuites magnétiques : elles diminuent aussi la tension secondaire.

Expériences. *a*) Sur les deux noyaux du transformateur démontable, plaçons des bobines de 600 spires.

Alimentons l'une de ces bobines à 115 volts; l'autre, *à vide*, donne 115 volts à ses bornes.

Faisons *débiter* le secondaire sur des lampes : quand il fournit 2 ampères, la tension, au secondaire n'est plus que 70 volts.

La chute de tension en charge, 45 volts, dépasse beaucoup la chute ohmique dans les enroulements dont la résistance est 2,5 ohms[1].

b) On explique cette chute de tension par les fuites magnétiques dans la carcasse du transformateur. La bobine secondaire, quand elle débite

1. Cette chute est relativement très grande; elle est due à la mauvaise construction de l'appareil notamment, par la disposition des deux enroulements, primaire et secondaire, sur les régions différentes du circuit magnétique.

du courant, tend à produire un flux opposé au flux produit par la bobine primaire. Il en résulte qu'une partie du flux qui traverse la bobine primaire ne traverse pas le secondaire et passe dans l'air (fig. 3). Dans ces conditions, le flux est plus faible dans le noyau secondaire que dans le noyau primaire, d'où diminution de la tension secondaire.

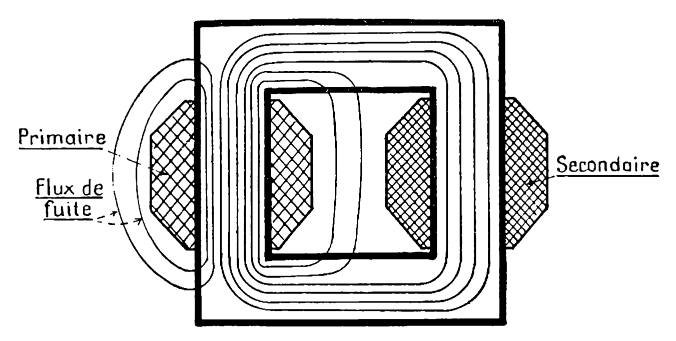


Fig. 3. — Fuites magnétiques dans un transformateur. Par suite de ces fuites, le flux qui traverse l'enroulement secondaire est plus faible que le flux qui traverse l'enroulement primaire.

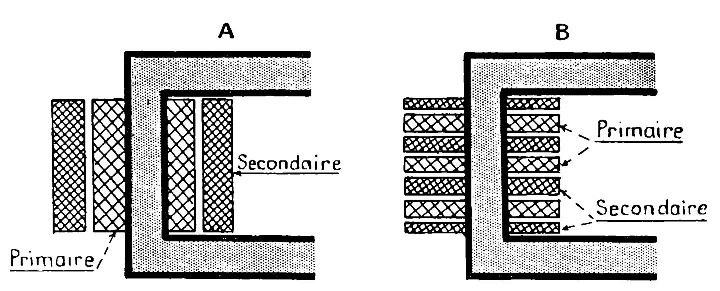


Fig. 4. — A. Transformateur à bobines concentriques.
B. Transformateur à galettes alternées : remarquer que la colonne se termine par deux demi-galettes H T.

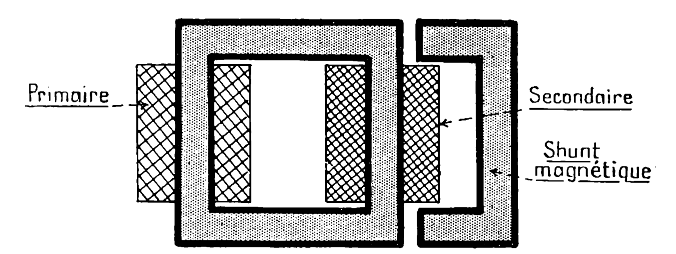


Fig. 5. — Transformateur de soudure avec shunt magnétique.

c) On réduit les fuites magnétiques dans les transformateurs industriels en répartissant chaque enroulement à la fois sur les deux noyaux, soit en les disposant en bobines concentriques, soit en alternant sur chaque noyau des galettes primaires et secondaires (fig. 4).

Dans les transformateurs pour la soudure électrique à l'arc, on exagère et on règle les fuites magnétiques avec un shunt magnétique déplaçable (fig. 5), pour limiter le courant dans l'arc et le courant de court-circuit quand l'électrode touche la pièce à souder.

III. RENDEMENT D'UN TRANSFORMATEUR

12. Le rendement est maximum quand les pertes dans le fer sont égales aux pertes dans le cuivre.

Soit P_2 la puissance débitée par le secondaire. Représentons par F les pertes dans le fer et par C les pertes dans le cuivre.

La puissance fournie au primaire est

$$P_1 = P_2 + F + C.$$

Le rendement du transformateur est :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + F + C}.$$

Or, nous savons que les pertes dans le cuivre sont à peu près proportionnelles au carré de la puissance P_2 fournie par le transformateur.

$$C = kP_2^2.$$

Donc

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + F + kP_2^2}.$$

Divisons tous les termes du second membre par P_2 :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{F}{P_2} + kP_2}$$

η est maximum quand la somme $\frac{F}{P_2} + kP_2$ est minimum. Comme le produit de ces deux nombres est constant, leur somme est minimum quand ils sont égaux :

$$\frac{F}{P_2} = kP_2, \qquad \text{d'où} \qquad F = kP_2^2 \qquad \text{soit} \qquad F = C.$$

13. On mesure le rendement d'un transformateur par la méthode des pertes séparées.

a) En principe, le procédé le plus simple pour obtenir le rendement d'un transformateur consiste à mesurer au wattmètre la puissance P_2

débitée par le secondaire, la puissance P_1 absorbée par le primaire et à faire le rapport de ces deux puissances.

En pratique, cette méthode ne convient pas. Un bon wattmètre donne des mesures approchées à 1 %. Comme le rendement d'un transformateur industriel est compris entre 0,95 et 0,98, les erreurs possibles sur les deux mesures de puissance peuvent en se cumulant atteindre 2 % et sont de l'ordre de grandeur des pertes.

b) Soit à déterminer le rendement pour une puissance au secondaire P_2. On mesure au wattmètre les pertes dans le fer par un essai à vide comme nous l'avons indiqué. On calcule les pertes dans le cuivre[1]

$$C = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2;$$

et l'on a :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + F + C}.$$

c) Le rendement des transformateurs industriels est excellent. A pleine charge, il atteint 0,95 pour les petits transformateurs et dépasse 0,98 pour les gros. Il reste très bon depuis 1/4 jusqu'à 5/4 de la pleine charge, en passant par un maximum que les constructeurs cherchent à obtenir, suivant les conditions d'emploi, pour un régime déterminé.

d) La puissance active fournie par un transformateur dépend du facteur de puissance du circuit sur lequel le secondaire débite. C'est pourquoi la puissance possible d'un transformateur s'indique en *k*VA.

Exercices.

1. Avec une carcasse magnétique dont la section est un carré de 20 *mm* de côté, on désire faire un transformateur 115 *V* — 2 *V*, 50 *p/s*. L'induction maximum sera 5 000 gauss. Calculer le nombre de spires de chaque enroulement.

2. La carcasse magnétique d'un transformateur monophasé a une section de 80 cm^2. La longueur de la ligne de force moyenne est 90 *cm*. L'ensemble des quatre joints magnétiques équivaut à un entrefer de 0,02 *cm*.

Le primaire comporte 120 spires et le secondaire 3 125. Aux bornes du primaire est appliquée une tension efficace de 115 volts, à 50 *Hz*.

Calculer :

1° la tension secondaire;

2° l'induction maximum. (On sait que pour une induction maximum de 1 Wb/m^2, une section de noyau de 100 cm^2, à la fréquence 50 *Hz*, la f. é. m. efficace dans une spire est 2,22 *V*.)

3° l'intensité magnétisante à vide. (On rappelle qu'elle est proportionnelle à l'in-

1. Il peut y avoir des pertes dans le cuivre par courants de Foucault; aussi préfère-t-on mesurer au wattmètre les pertes dans le cuivre au lieu de les calculer en appliquant la loi de Joule.

On met le secondaire en court-circuit sur un ampèremètre et l'on règle la tension primaire pour obtenir dans le secondaire l'intensité normale. On mesure au wattmètre la puissance absorbée. Comme la tension secondaire est presque nulle, *le flux est faible* et l'on peut admettre que la puissance absorbée est tout entière perdue dans le cuivre.

duction maximum jusqu'à 1 Wb/m^2 dans le fer, qu'il faut 5 At/cm pour obtenir 1 Wb/m^2 dans le fer et 8 000 At/cm pour obtenir 1 Wb/m^2 dans l'air. L'induction maximum est produite par l'intensité maximum du courant alternatif.)

3. Un transformateur de 60 kVA, 50 p/s, 10 000 V-200 V est essayé :

1° à vide; les pertes dans le fer sont 990 W;

2° en court-circuit; les pertes dans le cuivre sont :

50 W	pour 1,75 A	à la haute tension,
195 W	pour 3,5 A	—
800 W	pour 7,0 A	—
1 040 W	pour 8,0 A	—

Calculer le rendement du transformateur quand il débite 1,75 A, 3,5 A, 7,0 A, 8,0 A sur un réseau à 10 000 volts dont le facteur de puissance est 0,85. Construire la courbe de ce rendement en fonction de la puissance utile.

Échelles : en abscisses, 1 kW sera représenté par 2 mm; en ordonnées, on ne représentera que l'excès du rendement sur 0,90, un centième sera figuré par 1 cm.

4. La consommation en énergie électrique d'une école professionnelle est en moyenne la suivante :

pendant les jours de classes : 10 kW de 6 h à 8 h; 60 kW de 8 h à 10 h. 10 kW de 18 h à 21 h; 4 kW de 21 h à 6 h du matin;

les dimanches, en période de classes : 10 kW de 6 h à 8 h; 4 kW de 8 h à 18 h.; 10 kW de 18 h à 21 h; 4 kW de 21 h à 6 h du matin;

pendant 3 mois de vacances : 4 kW.

L'école est alimentée par un transformateur de 75 kVA branché en permanence sur la haute tension. Le rendement de ce transformateur est 0,96 quand il débite 60 kW et les pertes dans le fer sont alors égales aux pertes dans le cuivre. A d'autres régimes, les pertes dans le cuivre sont à peu près proportionnelles aux carrés des puissances débitées.

Quelle économie annuelle, évaluée en kW, réaliserait-on en remplaçant le transformateur de 75 kVA par un transformateur de 10 kVA, sauf les jours de classes où le plus gros transformateur serait seul mis en service de 8 h à 18 h?

Le rendement du transformateur de 10 kVA est 0,94 quand il fournit 10 kW et les pertes dans le cuivre sont alors égales aux pertes dans le fer. A d'autres régimes, les pertes dans le cuivre sont à peu près proportionnelles aux carrés des puissances débitées.

On comptera l'année de 360 jours, dont 40 dimanches en périodes de classes.

5. Pour déterminer si les bobines HT et BT d'un transformateur sont enroulées dans le même sens ou en sens contraires, on monte quelques éléments d'accumulateurs, avec un interrupteur, aux bornes de la HT en prenant soin de relier le pôle positif de la batterie à la borne choisie comme borne d'entrée des bobines, puis on connecte un voltmètre *polarisé* aux bornes de la BT en reliant sa borne positive à l'entrée des bobines. On ferme l'interrupteur. Si le voltmètre dévie dans son sens normal à la fermeture du courant, les bobines HT et BT sont enroulées dans le même sens.

Justifier le procédé.



Vue d'un groupe de trois transformateurs monophasés 220.000V/60.000V. constituant un transformateur triphasé. (Station de transformation de Viviez, Aveyron.)

22e LEÇON

Transformateurs triphasés. Applications des transformateurs.

I. TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS

1. Description d'un transformateur triphasé.

C'est surtout sous forme de courants triphasés que se distribue et s'utilise l'énergie électrique fournie par les centrales à courants alternatifs.

Pour modifier la tension et l'intensité d'une distribution triphasée, on peut employer trois transformateurs monophasés aussi identiques que possible (voir la frise). Les primaires, couplés en étoile ou en triangle, sont branchés sur la source triphasée. Des trois bornes des secondaires, couplés aussi en étoile ou en triangle, partent les trois lignes qui vont vers les récepteurs (fig. 1).

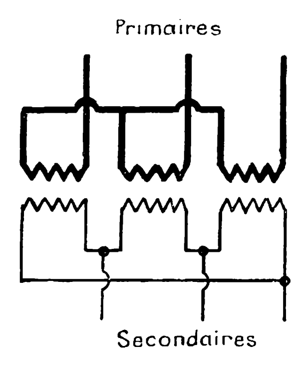


Fig. 1. — Groupement de trois transformateurs monophasés sur une distribution triphasée. Les primaires sont ici en étoile et les secondaires en triangle.

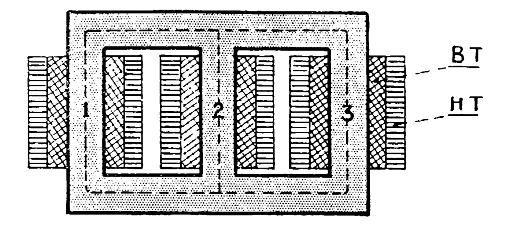


Fig. 2. *Transformateur triphasé* à noyaux dans un même plan.

On préfère, surtout pour les petites et moyennes puissances, un seul transformateur à trois noyaux au lieu de trois transformateurs monophasés. Dans le type de beaucoup le plus employé, ces trois noyaux sont dans le même plan et réunis par deux traverses ou culasses (fig. 2 et 3). Sur chaque noyau sont placés, en galettes alternées ou en bobines concentriques, l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire d'une phase. Les primaires d'une part, les secondaires de l'autre, sont couplés soit en étoile, soit en triangle.

Remarquons que les circuits magnétiques des deux noyaux

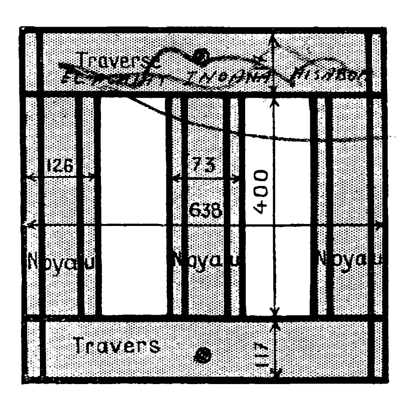


Fig. 3. — *Carcasse magnétique* d'un transformateur triphasé.

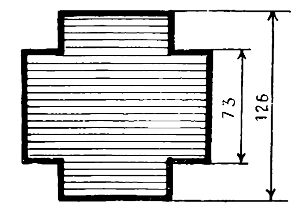


Fig. 4. — Section en croix de Saint-André d'un noyau de transformateur.

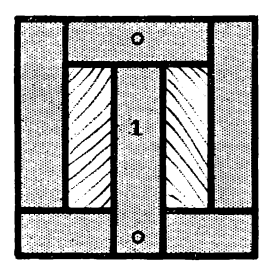
extrêmes 1 et 3 sont plus réluctants que le circuit magnétique du noyau 2. Cette dissymétrie est, pratiquement, sans importance.

Quelques détails sur la construction d'un transformateur triphasé de 50 *kVA* 1 500-220 *V*, 50 *p/s* préciseront les notions qui précèdent.

La *carcasse magnétique* est faite de tôles au silicium de seulement 0,4 *mm* d'épaisseur, isolées au papier, d'une qualité à très faibles pertes par hystérésis et courants de Foucault (1,35 watts par *kg* pour une induction maximum de 1 Wb/m^2 et une fréquence de 50 *p/s*).

La section des noyaux a la forme d'une croix de Saint-André (fig. 4). Cette section de 130 cm^2 au total correspond à une section utile de 114 cm^2, car il faut en déduire l'isolant compris entre les feuilles de tôle.

Les traverses ont une section rectangulaire totale de 146 cm^2, soit 127 cm^2 utiles.



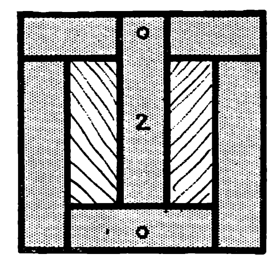


Fig. 5. — Disposition des couches successives de tôles de la carcasse d'un transformateur.

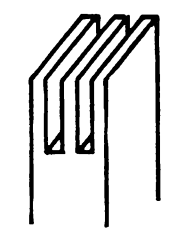


Fig. 6. — Pièce d'un assemblage à enfourchement.

Pour former un bon joint magnétique entre les noyaux et les traverses, on alterne les tôles par paquets de trois suivant les schémas 1 et 2 de la figure 5. Les *joints* sont dits *enchevêtrés*[1]; ils rappellent les assemblages à enfourchement des menuisiers (fig. 6). Deux fortes planches de bois serrent à bloc les tôles des traverses.

L'ensemble de la carcasse pèse 260 *kg*.

Chaque *bobine BT* est constituée par une barre de cuivre de section 4,5 × 12 *mm* enroulée sur champ en une hélice de 60 spires. Les spires sont recouvertes d'un ruban de coton (jaconas).

Les bobines BT sont enfilées sur les noyaux dont les huit arêtes sont isolées par une cornière en carton épais (fig. 7). Elles sont couplées en étoile avec neutre sorti.

La résistance entre phases est 0,025 ohm. Le poids du cuivre pour les trois bobines atteint près de 47 kilogrammes.

L'*enroulement HT* comprend par noyau 4 128 spires réparties en 12 bobines (fig. 8). Ces bobines sont de trois sortes. Deux, dites de *choc*, à la partie supérieure de la colonne où arrive le courant, sont faites de chacune 99 spires de fil de 1 *mm*, émaillé et couvert de quatre guipages de coton. Les couches de spires sont séparées les unes des autres par du papier isolant; un anneau de presspahn de 2 *mm* protège le dessus et le dessous de la bobine; une couche de jaconas enveloppe le tout. L'isolement de ces bobines de choc est donc très soigné : il doit en effet résister aux surtensions qui se produisent parfois en ligne.

1. Dans les très gros transformateurs, les joints sont plans. Ils sont dressés soigneusement pour obtenir un entrefer très réduit. Une feuille de mince papier est placée dans les joints.

A l'extrémité inférieure de la colonne sont placées quatre bobines de *réglage* de chacune 99 spires, en fil émaillé de 0,95 *mm* sous un guipage coton.

Enfin, six bobines de chacune 589 spires de fil de 0,95 *mm* couvert d'un guipage coton constituent la partie médiane de l'enroulement.

Dans toutes ces bobines, les couches successives de spires sont séparées par du papier isolant. Des anneaux de *presspahn*[1] sont placés dessus et dessous, un ruban de *jaconas*[2] entoure chaque bobine.

Les connexions entre bobines sont établies alternativement à l'intérieur et à l'extérieur de l'enroulement.

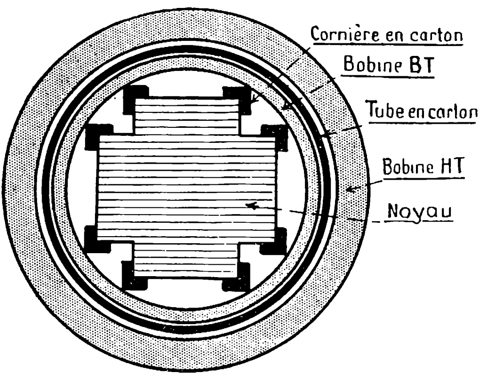


Fig. 7. — Coupe d'une colonne de transformateur perpendiculairement à l'axe du noyau.

Un tube de carton bakélisé épais de 4 *mm* enveloppe l'enroulement BT, l'enroulement HT est enfilé sur ce tube. Les deux enroulements sont donc concentriques (fig. 7).

Trois prises sont faites à la partie inférieure de chaque enroulement HT : à la fin de la première bobine, entre la deuxième et la troisième, entre la quatrième et la cinquième (fig. 8). Un commutateur permet de réunir ensemble trois prises correspondantes des trois enroulements. On réalise ainsi le couplage en étoile des trois phases HT avec soit 4 128, soit 3 930, soit 3 732 spires par colonne. Ce commutateur se manœuvre seulement quand le transformateur n'est pas sous ten-

Fig. 8. — Bobines d'un enroulement HT d'un transformateur avec coupe de l'une des bobines.

1. Le presspahn est du carton dur.
2. Le jaconas est une toile spéciale.

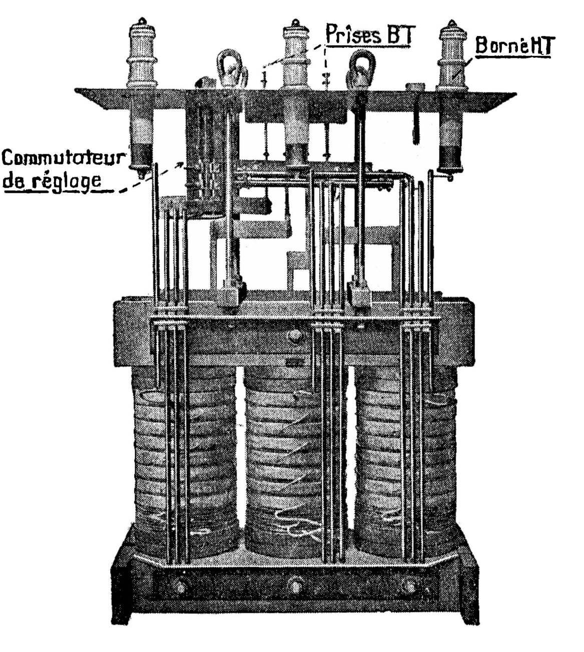


Fig. 9. — ***Transformateur monté.*** Remarquer le commutateur de réglage.

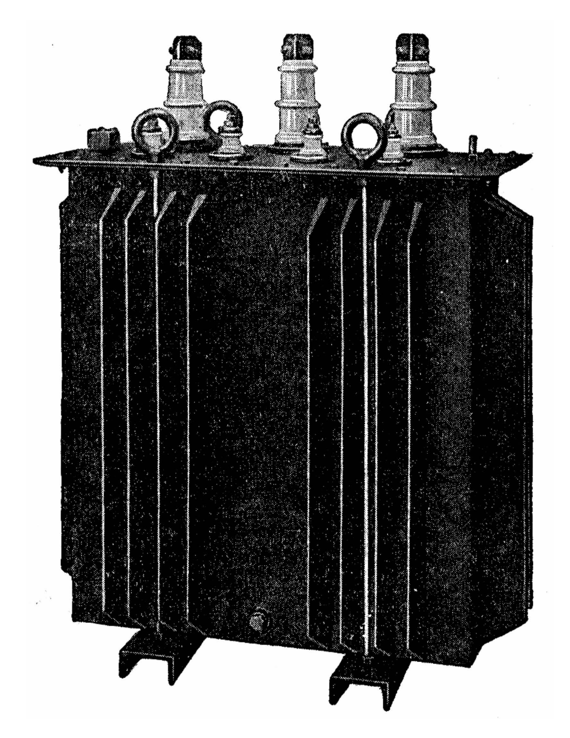


Fig. 10. — ***Transformateur dans sa cuve.*** Remarquer les trois bornes HT et les quatre bornes BT.

sion. C'est un dispositif de réglage pour compenser la chute de tension au secondaire que produit la charge.

Le poids total du cuivre des bobines HT dépasse un peu 55 kilogrammes. La résistance entre phases, quand toutes les bobines sont en circuit, est de 175 ohms.

Le transformateur est placé dans une cuve en tôle pleine d'huile minérale déshydratée. Les bornes de la haute et de la basse tension et la manette du commutateur de réglage sont fixées sur le couvercle de la cuve (fig. 9 et 10).

2. Couplage des enroulements.

Quand un transformateur triphasé est destiné à alimenter une distribution d'éclairage, le secondaire est couplé en étoile pour obtenir un

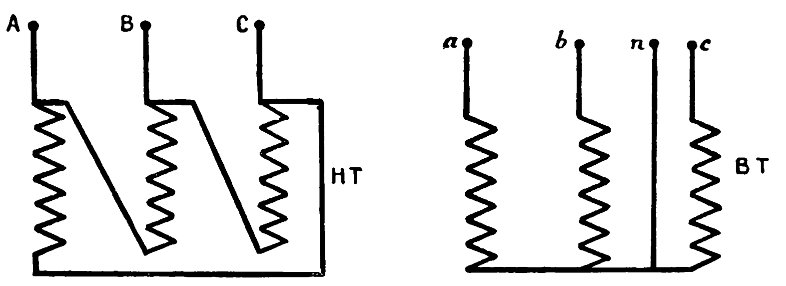


Fig. 11. — Schéma type de couplage d'un transformateur triphasé.

point neutre où connecter un fil d'équilibre et réaliser une distribution à quatre fils (fig. 11).

Pour répartir la charge sur plusieurs noyaux en cas de déséquilibre d'une phase, on recourt parfois à un couplage en étoile particulier, dit *en zigzag* (fig. 12). Chaque phase comprend deux demi-bobines placées sur deux noyaux différents et connectées en série en sens inverse. L'ensemble des trois phases est couplé en étoile avec une borne neutre.

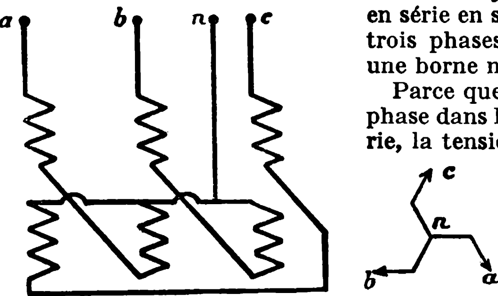


Fig. 12. — Secondaire couplé en étoile *zigzag*.

Parce que les tensions ne sont pas en phase dans les deux demi-bobines en série, la tension résultante est seulement $\frac{U_2\sqrt{3}}{2}$, alors que le couplage normal en étoile fournit la tension U_2.

Les *phases primaires* d'un transformateur triphasé sont toujours couplées en étoile ou en triangle. Dans chaque cas, le *secondaire* est monté soit en étoile, soit en triangle, soit en zigzag, ce qui donne six combi-

naisons possibles. Pour chacune, sur chaque colonne, à un instant quelconque, la f. é. m. secondaire à vide peut être dans le même sens ou en sens contraire de la tension primaire. On obtient le sens désiré, soit au montage, en choisissant comme entrée l'une ou l'autre extrémité de l'enroulement secondaire, soit à la construction, en enroulant les bobines secondaires dans un sens ou dans l'autre. Il existe donc, au total, *douze modes de couplage des enroulements des transformateurs triphasés.*

On les a répartis en quatre groupes repérés par les désignations G_1, G_2, G_3 en mettant dans un même groupe les couplages qui donnent la même valeur et le même sens au déphasage des f. é. m. secondaires à vide par rapport aux tensions primaires. On en trouvera les schémas dans la brochure C. 4 de l'Union des Syndicats de l'Électricité.

Trois seulement de ces couplages ont été normalisés. Leurs schémas sont représentés par la figure 12 *bis;* chaque vecteur y indique la direction et le sens des tensions primaires et des f. é. m. secondaires à un instant déterminé. La plaque signalétique d'un transformateur doit porter la désignation du groupe de couplage de l'appareil et le schéma vectoriel correspondant.

Fig. 12 *bis.* — Couplages normalisés des enroulements de transformateurs triphasés.
Les f. é. m. secondaires et les tensions primaires sont
en phase dans le type G12
déphasées de — 30° dans les types G31 et G33.

Pour alimenter les commutatrices transformant des courants triphasés en courant continu, on prend au secondaire d'un transformateur triphasé des courants hexaphasés que l'on obtient en connectant ensemble les trois points milieux des enroulements secondaires pour former le neutre et en branchant six lignes aux extrémités libres des bobines (fig. 13).

Dans les schémas, on représente un transformateur triphasé par l'un ou l'autre des symboles de la figure 14.

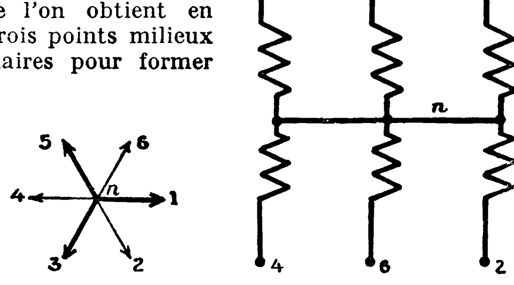


Fig. 13. — Secondaire couplé en hexaphasé.

3. Refroidissement des transformateurs.

Malgré leur rendement excellent, les gros transformateurs perdent en chaleur une puissance considérable; par exemple, un transformateur de 10 000 *kVA* de rendement 0,99 dégage en chaleur 100 *kW*. Il faut le refroidir énergiquement pour éviter une élévation dangereuse de température.

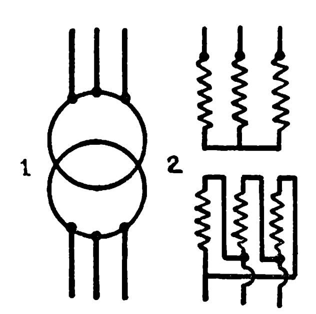


Fig. 14. — Symboles graphiques représentant un transformateur triphasé.

Jusqu'à 30 *kVA*, le refroidissement par l'air ambiant peut suffire. Les transformateurs plus puissants ou à tension élevée sont plongés dans une cuve pleine d'huile; la cuve est en tôle ondulée pour augmenter la surface de refroidissement. Parfois un dispositif à thermo-siphon est adapté à la cuve. Des moyens de refroidissement plus énergiques sont employés quand il s'agit de gros transformateurs : ou des serpentins parcourus par un courant d'eau froide sont plongés dans la cuve, ou une pompe fait circuler l'huile dans un réfrigérant, ou un ventilateur souffle de l'air sur des radiateurs où l'huile circule par convection, etc.

II. USAGES DES TRANSFORMATEURS

4. Transport d'énergie électrique.

Expériences. — Construisons une ligne de trois mètres de longueur avec deux fils RNC[1] de 0,2 *mm* de diamètre montés sur des poulies isolantes. Nous nous proposons de transporter dans cette ligne la puissance nécessaire à une lampe de 60 *W*, 115 *V*.

Montons la lampe à une extrémité de la ligne et appliquons une tension alternative de 115 volts à l'autre extrémité : la lampe rougit à peine.

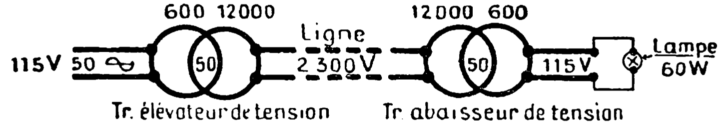


Fig. 15. — Réalisation d'un *transport d'énergie de 60 W à 2 300 volts.*

Installons aux extrémités de la ligne deux petits transformateurs 600-12 000 spires comme l'indique la figure 15 : la lampe brille normalement.

Dans le premier cas, la résistance de la ligne, qui est voisine de 200 Ω ajoutée à celle de la lampe qui est aussi environ 200 Ω, ne permet, sous

1. Les alliages RNC sont composés de nickel, de chrome et de fer. Leur résistivité est voisine de 100 microhms-centimètre. Ils supportent, en service continu, des températures de 700 à 1 200° suivant le type d'alliage.

la tension de 115 volts, qu'une intensité de 0,28 *A*, alors qu'il en faut le double pour que la lampe fonctionne convenablement. La chute de tension dans la ligne est la moitié de la tension totale. Le transport d'énergie est réalisé de façon très défectueuse.

Dans le second cas, le premier transformateur élève la tension à $115 \times \frac{12\,000}{600} = 2\,300$ *V*. Pour transporter 60 watts, il suffit alors de $\frac{60}{2\,300} = 0{,}026$ *A*. La chute de tension dans la ligne de 200 Ω et les deux enroulement HT des transformateurs, dont la résistance est 1 800 Ω pour chacun, atteint :

$$0{,}026 \times 3\,800 = 97 \text{ volts.}$$

soit seulement un peu plus de 4 % de la tension totale **2 300 *V***. Le transport d'énergie est effectué dans de bonnes conditions.

Cette expérience montre le principe des transports industriels d'énergie : ***élever beaucoup la tension dans la ligne pour réduire les pertes ohmiques dans cette ligne.***

Des centrales thermiques sont installées dans les régions houillères, des centrales hydrauliques sur les cours d'eau soit à fort débit (Rhin) soit à différences de niveaux considérables (Alpes, Pyrénées, Massif central). Des alternateurs triphasés y produisent des courants sous 8 000 ou 10 000 volts. De puissants transformateurs élévateurs de tension montent la tension à 220 000 volts. Le transport d'énergie est effectué à cette tension jusqu'aux grands centres de distribution. Là, des transformateurs abaisseurs de tension ramènent la tension à 60 000 ou 15 000 volts pour conduire l'énergie jusqu'aux localités de consommation où de nouveaux transformateurs abaissent la tension à 115 et 200 volts.

Cet emploi des transformateurs est le plus important.

5. Quelques autres usages des transformateurs.

Des transformateurs sont incorporés dans certains appareils électriques; par exemple, les appareils récepteurs de T. S. F. en comportent plusieurs, de très faible puissance.

Nous avons signalé que des transformateurs actionnent les sonneries d'appartement, servent pour la soudure à l'arc électrique avec une électrode de même nature que le métal à souder, pour la soudure par points, pour la brasure.

Chaque fois que l'on a besoin d'une tension ou plus élevée ou plus basse que celle que fournit le réseau de distribution, on utilise un transformateur.

Ainsi les tubes au néon qui constituent les enseignes lumineuses fonctionnent sous une tension de plusieurs milliers de volts : on les alimente avec des transformateurs.

Inversement, les lampes baladeuses, pour n'être pas dangereuses, sont branchées sur de petits transformateurs fournissant 24 volts.

6. Mise en parallèle de transformateurs triphasés.

Quand plusieurs transformateurs sont alimentés par un même réseau primaire et débitent dans un même réseau secondaire, on dit qu'ils sont montés en parallèle.

Pour que plusieurs transformateurs puissent être mis en parallèle :

1° il faut qu'ils aient des f. é. m. secondaires égales à vide, en d'autres termes qu'ils aient *même rapport de transformation* pour éviter des courants compensateurs d'un appareil à l'autre, même quand le réseau secondaire n'est pas en charge;

2° il est nécessaire que les f. é. m. secondaires soient déphasées de la même façon par rapport aux tensions primaires correspondantes sans quoi, à chaque instant, elles seraient différentes et les transformateurs débiteraient les uns dans les autres. Ne peuvent donc être montés en parallèle que des transformateurs appartenant au *même groupe de couplage* (§ 2);

3° enfin pour que les tensions secondaires restent égales quand les transformateurs débitent, les chutes de tension dans chacun des appareils doivent être les mêmes pour des débits dans le rapport des puissances nominales. Si cette condition n'est pas remplie, le transformateur pour lequel la chute de tension est la plus faible se charge plus qu'il ne convient.

Soit I ampères le débit à pleine charge d'une phase d'un transformateur et u la chute de tension par phase quand le transformateur débite la fraction n de sa charge normale et fournit I : n ampères. Nous pouvons écrire :

$$u = Z\frac{I}{n}.$$

Z est l'impédance d'une phase rapportée au secondaire, nous admettrons qu'elle ne dépend pas de n et qu'elle est constante.

Pour un autre transformateur :

$$u' = Z'\frac{I'}{n}.$$

Pour que $u = u'_3$, il faut $ZI = Z'I'$. Les impédances doivent être dans le rapport inverse des débits à pleine charge, c'est-à-dire des puissances, puisque les tensions secondaires sont égales.

L'essai en court-circuit d'un transformateur donne une mesure de ZI. Il consiste à réunir par des conducteurs gros et courts les trois bornes de sortie du secondaire en plaçant un ampèremètre dans l'une des phases et à mesurer la tension primaire U_{cc} nécessaire pour obtenir dans le secondaire l'intensité normale I. Si k est le rapport de transformation on a

$$kU_{cc} = ZI.$$

On donne à U_{cc} le nom de *tension de court-circuit* et l'on voit que la condition $ZI = Z'I'$ pour la possibilité de mise en parallèle de transformateurs se traduit par l'*égalité des tensions de court-circuit.*

Cette égalité, facile à réaliser pour des transformateurs de même puissance et de même construction, est par contre difficile à obtenir

pour des transformateurs de puissances différentes fabriqués par des constructeurs différents, aussi déconseille-t-on la mise en parallèle de deux transformateurs quand la puissance du plus gros dépasse deux fois celle du petit.

Si les groupes de couplages de deux transformateurs triphasés que l'on désire mettre en parallèle ne sont pas connus, on procède à l'essai de polarité suivant : on connecte la haute tension des deux appareils aux barres d'un réseau, les bornes homologues étant réunies à la même barre; on relie ensuite par un conducteur deux bornes homologues de la basse tension, puis on monte deux voltmètres capables de supporter une tension double de celle que fournit chacun des transformateurs entre les deux autres paires de bornes, (fig. 15 *bis*).

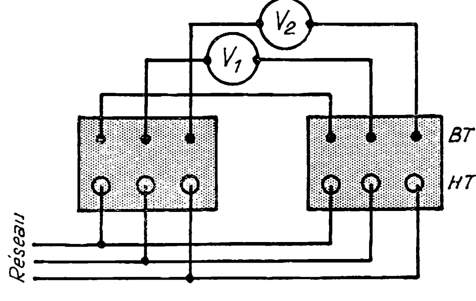


Fig. 15 *bis*. — Recherche des bornes de même polarité de deux transformateurs triphasés.

Si les voltmètres n'indiquent aucune tension, on peut faire la mise en parallèle, sinon on cherche à grouper les bornes par paires de façon que les voltmètres restent au zéro et on n'effectue le montage en parallèle qu'après avoir obtenu ce résultat.

7. Transformateurs de mesures.

a) ***Transformateurs de tension.*** — On ne construit guère de voltmètre pour courant alternatif mesurant directement plus de 600 volts. Leur emploi serait dangereux pour l'observateur. Pour mesurer les tensions plus élevées, on les réduit avec des transformateurs de tension. Ce sont des transformateurs de faible puissance (5 à 1 500 *VA*), à sec ou dans l'huile, dont le rapport de transformation a été ajusté avec précision et qui réduisent la tension primaire dans un rapport connu permettant d'employer au secondaire un voltmètre de 100 ou 150 volts.

b) ***Transformateurs d'intensité.*** — Ce sont des transformateurs construits pour donner 5 ou 10 ampères au secondaire quand le primaire est parcouru par l'intensité correspondant à leur calibre maximum.

Nous avons décrit les pinces ampèremétriques qui sont des transformateurs d'intensité fort commodes pour des mesures rapides.

8. Auto-transformateurs.

Ces transformateurs n'ont qu'un enroulement sur un circuit magnétique fermé (fig. 16). Une borne A est commune au primaire et au secondaire; une autre borne B est la seconde borne primaire. Une ou plusieurs prises sur l'enroulement constituent la seconde borne secondaire.

L'enroulement unique peut être considéré comme résultant de la réunion en un seul des enroulements primaire et secondaire. Le rapport de transformation est, comme dans un transformateur ordinaire :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

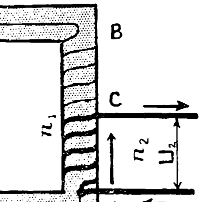


Fig. 16. — ***Auto-transformateur.*** Les flèches indiquent le sens des courants à un instant donné. Remarquer que ces courants sont de sens différents dans la partie de l'enroulement qui leur est commune.

Les auto-transformateurs peuvent être élévateurs ou abaisseurs de tension. Dans la partie commune au primaire et au secondaire, l'intensité est la somme géométrique des deux intensités partielles.

Ces appareils sont surtout employés comme *réducteurs de tension.* Ils ont l'inconvénient de mettre, par rapport à la terre, l'appareil récepteur sous la tension totale du réseau.

On utilise des auto-transformateurs à plusieurs prises pour démarrer des moteurs à courant alternatif à une tension plus basse que leur tension de régime (fig. 17).

Fig. 17. — Auto-transformateur abaissant la tension U_2 aux bornes d'un moteur et augmentant l'intensité I pendant le démarrage.

Exercices.

1. Un petit transformateur triphasé possède un enroulement BT de 200 spires par noyau et un enroulement HT de 1 066 spires par noyau.

La BT est couplée en étoile.

Alimenté à la BT par des courants triphasés à 50 *p/s*, 200 *V* entre phases, le transformateur fournit 1 000 volts à la HT.

Comment la HT est-elle couplée?

Quelle tension obtiendrait-on avec un autre couplage?

2. Un transformateur a été calculé et construit pour être alimenté par du *c. a.* à 200 *V* 50 *p/s*.

Y a-t-il inconvénient à l'alimenter à 115 *V*, 50 *p/s?*

Peut-on l'alimenter avec du courant à 200 *V*, 25 *p/s?*

3. Un transformateur triphasé comporte par noyau 35 spires à la BT et 2 856 spires à la HT. Les enroulements BT sont montés en étoile, les enroulements HT en triangle.

Calculer le rapport de transformation théorique.

On a mesuré 10 000 V en HT et 211 V en basse tension. Quel est le rapport de transformation réel?

Alimenté en HT par 3,65 *A* sous 10 000 *V*, le transformateur a fourni à la BT 172 *A* sous 206 *V*.

Quelle est la chute de tension en tant pour cent?

(Se servir du rapport de transformation réel.)

Les noyaux de la carcasse magnétique ont une section utile de 150 cm^2. A quelle induction maximum fonctionne le transformateur?

4. Un transformateur 50 *kVA* absorbe à vide 254 *W*. En charge, pour un facteur de puissance de 0,80, son rendement est 0,96. Il est constamment branché sur la ligne de distribution d'énergie. Il fonctionne à vide 20 heures par jour et à pleine charge pendant 4 heures en absorbant 40 *kW*. Déterminer son rendement journalier moyen.

5. On applique aux bornes de la BT du transformateur décrit dans le paragraphe 1 de la 22e leçon une tension triphasée à 50 *p/s* de 229 volts entre phases.

1° Calculer l'induction maximum dans les noyaux.

2° Calculer l'induction maximum dans les traverses.

3° Déterminer le volume utile des noyaux et celui des traverses.

Sachant que le poids total de la carcasse est 236 *kg*, calculer le poids des noyaux et le poids des traverses.

Étant donné que les pertes dans les tôles sont de 1,35 *W* par *kg* quand l'induction maximum est 1 Wb/m^2 et la fréquence 50 *p/s*, calculer les pertes magnétiques dans la carcasse en admettant qu'elles sont proportionnelles au carré de l'induction. On sait que ces pertes sont constantes.

4° En charge, le transformateur est branché sur 15 000 *V* entre phases. Le courant primaire est 2 *A*, le courant secondaire 131 *A*. Les résistances entre phases sont 175 et 0,025 ohms. Calculer les pertes en chaleur Joule.

5° Déterminer le rendement en charge du transformateur en supposant son facteur de puissance égal à l'unité.

6. Trois transformateurs monophasés de même puissance alimentés au primaire à 200 *V* fournissent 115 *V* au secondaire.

On branche les primaires en triangle sur un réseau triphasé à 200 *V* entre phases et l'on réunit trois bornes des secondaires pensant obtenir ainsi un couplage en étoile.

Si le couplage est correct quelles tensions simples et composées doit-il fournir?

On constate, avec un voltmètre, qu'il existe effectivement une tension de 115 *V* entre la borne commune et chacune des extrémités libres, I, II, et III des secondaires, mais on mesure 115 *V* entre I et II, II et III et 200 *V* entre I et III. Expliquer ce fait, donner le schéma vectoriel du couplage effectivement réalisé. Indiquer les modifications à effectuer pour obtenir un couplage en étoile.

Calcul d'un transformateur.

A titre de révision de l'étude des transformateurs, on peut se proposer d'établir, dans ses grandes lignes, l'avant-projet de construction d'un petit transformateur monophasé à refroidissement dans l'air. Nous avons vu, en établissant le projet d'un électro-aimant, que l'on utilise dans de tels calculs beaucoup de données empiriques.

L'ordre de l'étude peut être le suivant :

Données. — Puissance apparente : $Pa = 1\,000$ *VA*, Tensions : $U_1 = 115$ *V*, U_2 (à vide) $= 550$ *V*; Fréquence 50 *p/s*; Induction maximum : 0,8 Wb/m^2; Enroulements concentriques.

Circuit magnétique. — En employant des tôles minces (0,5 *mm*), au silicium, on peut obtenir 800 à 1 020 *VA* par dm^3 de fer.

Essayons une section de 20 cm^2 et une longueur de circuit magnétique de 50 *cm*. Compte tenu de l'isolement des tôles, la section des noyaux sera 40 *mm* × 55 *mm*. Adoptons, sous réserve de modifications ultérieures, des noyaux longs de 130 *mm* et des traverses de 160 *mm*.

Enroulement primaire. — Le nombre de spires nécessaires pour obtenir une f. c. é. m. de 115 *V* est (voir 21e leçon) :

$$\frac{115}{4{,}44 \times 50 \times 20.10^{-4} \times 0{,}8} = 328 \text{ environ.}$$

soit 164 par noyau.

L'intensité primaire en charge sera environ 10 *A*. En choisissant une densité de 2 *A* par mm^2, il faudra du fil de 2,5 *mm* de diamètre que l'isolement coton porte à 2,8 *mm*. On logera 41 spires par couche, l'enroulement aura 115 *mm* de long et la bobine pourra être munie de joues épaisses de 5 à 6 *mm*. Chaque bobine portera 4 couches ayant une épaisseur totale d'environ 12 *mm*.

En comptant 5 *mm* pour l'épaisseur de la carcasse en presspahn, la bobine primaire mesure extérieurement 74 *mm* × 89 *mm*.

Une spire moyenne a pour longueur 280 *mm*. La longueur totale du fil primaire est 0,280 × 328 = 92 *m* et sa résistance 0,32 Ω.

Enroulement secondaire.

Pour produire 550 *V* à vide, il comptera :

$$328 \times \frac{550}{115} = 1\,580 \text{ spires environ}$$

soit 790 par bobine.

L'intensité en charge est un peu inférieure à 2 *A*. Pour une densité de 2 A par mm^2, il faudra du fil de 1,2 *mm* qui, émaillé et isolé d'une couche coton, atteindra 1,45 *mm*. On placera 79 spires par couche, sur une longueur de 115 *mm*. L'enroulement comportera 10 couches et aura une épaisseur totale voisine de 15 *mm*.

La carcasse étant épaisse de 5 *mm*, la bobine aura pour dimensions extérieures 115 et 130 *mm*.

La longueur d'une spire moyenne est 430 *mm*. Le fil de l'enroulement secondaire a pour longueur :

$$0{,}43 \times 1\,580 = 680 \ m$$

et pour résistance, environ 10,5 Ω.

Encombrement des bobines. — La largeur d'une bobine secondaire est 115 *mm* alors que la distance d'axes des noyaux est 120 *mm*. On aura donc tout juste la place pour loger les enroulements.

Pertes dans le transformateur. — La carcasse magnétique pèse 8,300 *kg*. On peut estimer les pertes dans le fer à 16 *W*.

A pleine charge, les pertes en chaleur Joule seront

dans le primaire : $0{,}32 \times 10^2 = 32 \ W$,

dans le secondaire : $10{,}5 \times 2^2 = 42 \ W$,

soit au total 90 *W*.

Le rendement atteindra : $\dfrac{1\,000}{1\,090} = 0{,}92$.

Refroidissement. — La surface extérieure de l'enroulement secondaire est 1 170 cm^2, soit 13 cm^2 par watt à dissiper en chaleur. C'est un peu faible si le transformateur doit fonctionner en service continu.

Le calcul devrait être recommencé en portant l'induction maximum à 1 Wb/m^2 et en diminuant la densité de courant dans les enroulements. L'enroulement primaire serait constitué par deux fils en parallèle.

Alternateurs.

On nomme ***alternateurs*** les ***générateurs de courant alternatif.*** La plupart sont des machines très puissantes en service dans les centrales thermiques ou hydrauliques.

En électrotechnique les f. é. m. alternatives sont produites par induction, c'est-à-dire par *déplacement relatif* d'un circuit *induit* par rapport à un circuit *inducteur.*

Actuellement, pour les alternateurs de grande puissance l'***induit*** est ***fixe*** et l'***inducteur mobile.*** Deux formes sont adoptées : les *alternateurs à pôles inducteurs saillants,* dont la vitesse est relativement lente, sont entraînés par des turbines hydrauliques, des moteurs à gaz ou Diesel; les *turbo-alternateurs,* à inducteurs lisses, sont accouplés à des turbines à vapeur ou hydrauliques tournant à grande vitesse.

Certains alternateurs de petite puissance ont un inducteur fixe et un induit mobile.

A. Alternateurs monophasés.

1. Description d'un alternateur à pôles saillants.

Il se compose d'un *inducteur mobile* ou ***rotor*** et d'un *induit fixe* ou ***stator.***

Inducteur. Il est formé de *noyaux polaires* fixés sur la jante d'un volant en acier coulé (fig. 1). Ces noyaux sont terminés par des *pièces polaires.* Ils sont entourés de bobines connectées en série (non représentées sur la fig. 2) recevant du courant continu amené

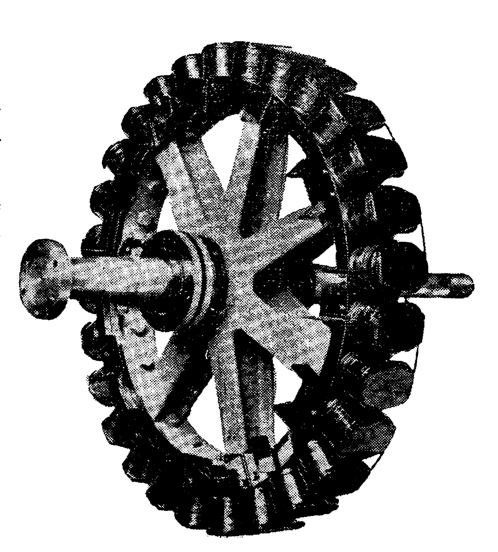


Fig. 1. — ***Rotor alternateur à pôles saillants.*** Comptez le nombre de pôles. Observez les bagues d'alimentation.

par deux frotteurs fixes et deux bagues isolées tournant avec le rotor.

Les pôles sont alternativement nord et sud; leur nombre total 2 p est toujours pair. Certains rotors n'ont que 4 pôles, il en est qui en possèdent 60; l'angle $\pi : p$ *radians* ou 180 : p degrés des axes de deux pôles voisins est dit *pas polaire.*

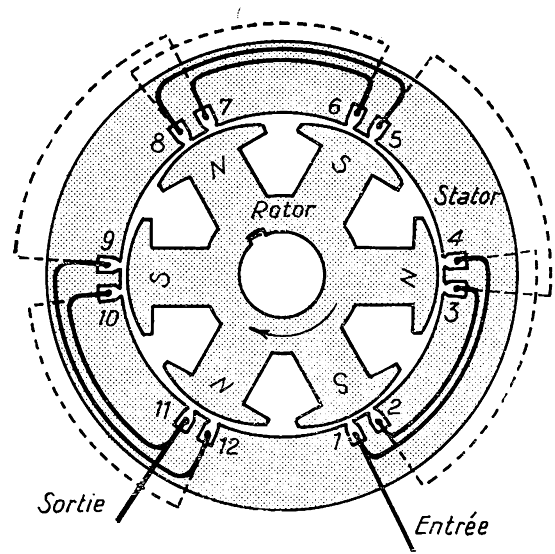


Fig. 2. — ***Rotor, stator*** et ***enroulement*** d'un alternateur à 6 pôles. Les connexions entre bobines sont représentées en pointillé.

Induit. L'inducteur tourne à l'intérieur d'un anneau magnétique fixe qui porte l'*enroulement induit* (fig. 3).

Pour éviter les courants de Foucault, l'anneau est constitué par un empilement de tôles minces isolées entre elles. Des encoches sont entaillées dans l'anneau, du côté intérieur, en face de l'inducteur, pour loger l'enroulement.

La figure 2 représente schématiquement l'enroulement induit d'un alternateur ayant 6 pôles et 12 encoches.

Dans chaque encoche passent plusieurs con-

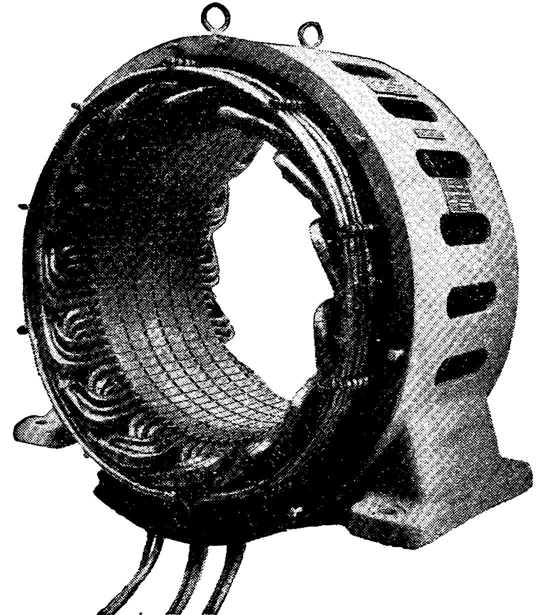


Fig. 3. — *Stator d'alternateur.* Observez à l'intérieur du bâti en acier coulé l'anneau formé de tôles empilées, avec des intervalles de ventilation; et dans les encoches à l'intérieur de cet anneau l'*enroulement induit.*

ducteurs formant la *partie active* d'une bobine. Par exemple une bobine est logée dans les encoches 1-4, une autre, du même nombre de spires, dans les encoches 2-3, etc.

Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine. Elles constituent l'*entrée* et la *sortie* de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'*enroulement est ouvert.*

Parce que l'induit est fixe, on peut isoler fortement ses conducteurs; aussi construit-on des alternateurs qui produisent des f. é. m. atteignant jusqu'à 15 000 *volts*.

2. Description d'un turbo-alternateur.

Ce sont des alternateurs de grande puissance construits pour une grande vitesse de rotation. Le rotor est manchonné en bout d'arbre d'une turbine qui tourne à 3 000 ou à 1 500 *tr/mn*.

A cause des effets d'inertie centrifuge produits par ces grandes vitesses, on limite la vitesse linéaire à la périphérie de l'inducteur à 150 *m/s*;

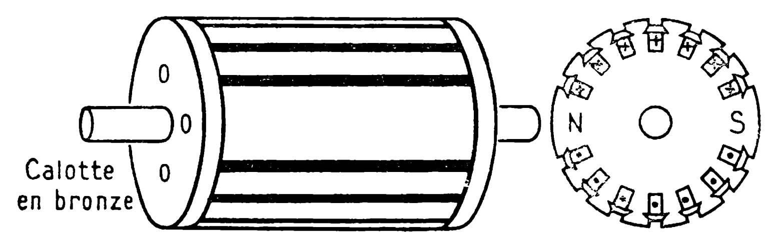


Fig. 4. — *Rotor lisse d'un turbo-alternateur.*

le diamètre du rotor est donc au plus de 1 *m* pour les alternateurs à 3 000 *tr/mn*.

Les turbines à vapeur ne sont avantageuses que si elles sont de grande puissance. Aussi construit-on des turbo-alternateurs de 50 000 et même 100 000 *kVA*.

La puissance d'une machine dépend du produit $D^2 \times L$ du carré du diamètre D de son entrefer par la longueur L de sa partie active. Les turbo-alternateurs ayant un *diamètre relativement faible*, on obtient des machines puissantes en leur donnant une *grande longueur* qui dépasse parfois 4 *mètres*.

L'induit est construit comme celui des alternateurs à pôles saillants. Les tôles sont séparées en plusieurs paquets laissant entre eux des intervalles de ventilation.

L'inducteur est cylindrique, sans pôles saillants. C'est un cylindre d'acier massif dans lequel des encoches sont creusées suivant des génératrices pour loger l'enroulement inducteur (fig. 4). Cet enroulement est souvent formé à l'aide de barres de cuivre; il est très solidement fixé par des frettes.

3. Fonctionnement d'un alternateur monophasé à vide.

a) *Champ magnétique dans l'entrefer.*

Un courant continu passe dans les bobines de l'inducteur et aimante les pôles (fig. 5). Les lignes d'induction sortent par chaque pôle nord, traversent l'entrefer entre les pièces polaires et le stator, puis bifurquent à gauche et à droite pour passer dans les deux pôles sud voisins après avoir traversé une seconde fois l'entrefer. L'*induction dans l'entrefer est radiale* dirigée du rotor vers le stator en face d'un pôle nord, en sens inverse en face d'un pôle sud.

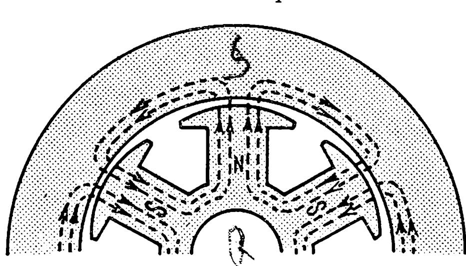


Fig. 5. — Tracé des lignes d'induction dans une portion d'alternateur.

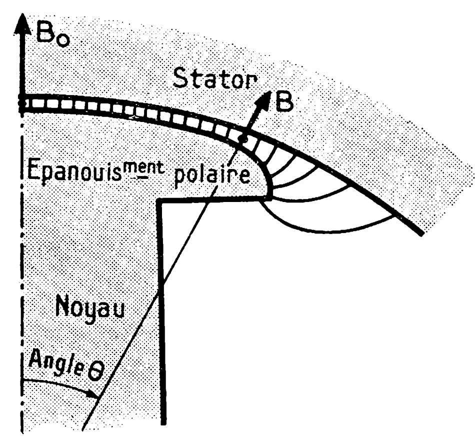


Fig. 6. — Les épanouissements polaires ne sont pas concentriques au stator. L'induction magnétique est plus grande dans l'axe du pôle que vers les cornes polaires. (Les encoches du stator ne sont pas figurées.)

Dans les alternateurs à pôles saillants la surface extérieure des pièces polaires n'est pas concentrique avec le stator : l'entrefer est plus grand aux extrémités des pièces polaires qu'au milieu (fig. 6). L'induction n'a pas la même valeur en tous les points de l'entrefer. Par une courbure convenable de la surface des pièces polaires, les constructeurs obtiennent une *répartition pratiquement sinusoïdale de l'induction magnétique* le long de l'entrefer (fig. 7).

On peut obtenir le même résultat dans les inducteurs à pôles lisses en étudiant la répartition des conducteurs entre les différentes encoches.

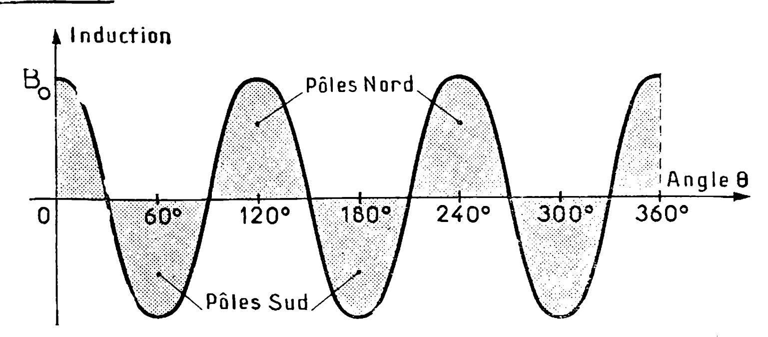


Fig. 7. — Le long de l'entrefer la courbe représentative de l'induction magnétique est une sinusoïde. L'alternateur étudié a six pôles, le *pas polaire* est 60°.

Lorsque l'inducteur tourne, il entraîne avec lui son champ magnétique. L'entrefer est le siège d'un ***champ magnétique tournant*** ou ***glissant*** à la vitesse du rotor.

b) ***F. é. m. produite dans un conducteur de l'induit.***

Par suite de sa rotation le champ inducteur coupe les conducteurs de l'induit. Une f. é. m. est induite dans chaque conducteur. Cette f. é. m. est donnée par la relation $e = B.l.v.$

Puisque la vitesse est constante, la f. é. m. induite dans un conducteur à un instant donné est proportionnelle à l'induction dans l'entrefer en face du conducteur à cet instant.

L'induction magnétique ayant une répartition sinusoïdale le long de l'entrefer, ***la f. é. m. est une fonction sinusoidale du temps.*** Sa valeur maximum est la même pour tous les conducteurs, mais sa phase dépend de la position du conducteur.

En particulier, ces *f. é. m.* sont en opposition dans deux conducteurs placés identiquement sous deux pôles de noms contraires, donc séparés d'un *pas polaire.*

Fig. 8. — Les conducteurs étant en série ces deux enroulements sont équivalents. Ils fournissent la même f. é. m.

c) ***Couplage des conducteurs.***

Il faut les réunir de façon que leurs f. é. m. instantanées s'ajoutent. Il est possible de former une spire avec les conducteurs 1 et 3 distants d'un pas polaire (fig. 8 *a*), puis une deuxième spire avec les conducteurs 2 et 4. Ces conducteurs

étant tous en série, la disposition de la figure 8 *b* est en tout point équivalente.

La figure 9 est le développement de l'enroulement induit de l'alterna-

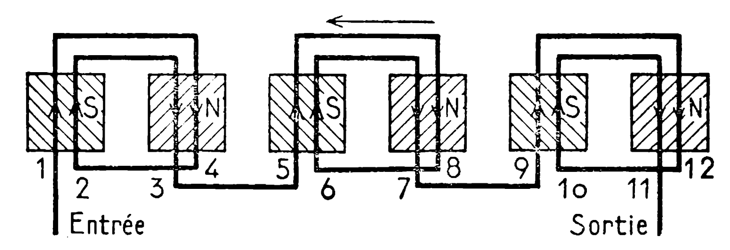


Fig. 9. — *Enroulement induit monophasé.* En réalité pour constituer une bobine, le conducteur passe plusieurs fois dans chaque encoche. Par exemple, la bobine 1-4 compte 16 tours de fil; il en est de même de la bobine 2-3 et de toutes les autres.

teur à 6 pôles représenté figure 2. Les différentes bobines, 1-4 et 2-3, 5-8 et 6-7, 9-12 et 10-11 sont en série, chacune d'elles peut comprendre plusieurs spires; la f. é. m. de l'alternateur est égale à trois fois celle induite dans l'ensemble 1-4 et 2-3 correspondant à deux pôles.

4. Fréquence de la f. é. m.

La f. é. m. dans un conducteur de l'induit reprend la même valeur et le même sens quand l'inducteur a tourné de l'angle 2 π : *p radians* que font les axes de deux pôles de même nom consécutifs.

Si l'inducteur fait *n tours par seconde,* il tourne d'un tour ou 2 π *radians* en 1 : *n secondes* et de 2 π : *p radians* en 1 : *pn* secondes : c'est la période T de la f. é. m.

Puisque la fréquence $f = \dfrac{1}{T}$, on a :

$$\underset{hertz}{f} = p \underset{tr/s}{n}$$

Pour obtenir la fréquence de 50 *Hz*, les alternateurs des centrales électriques tournent à des vitesses fixes, suivant leur nombre de pôles :

alternateurs à	2 pôles : $p = 1$	$n =$	50 *tr/s*	ou	3 000 *tr/mn*
—	4 pôles : $p = 2$	$n =$	25 —	ou	1 500 —
—	6 pôles : $p = 3$	$n =$	16,6 —	ou	1 000 —
. . . . .	. . . . .	. . .	. . . .	. .	. . . . .
—	20 pôles : $p = 10$	$n =$	5 —	ou	300 —

5. Valeur de la f. é. m.

Comme la f. é. m. d'une dynamo multipolaire, la f. é. m. d'un alternateur est proportionnelle :
au flux sortant d'un pôle, Φ *webers;*
à la vitesse de rotation du rotor, *n tours par seconde;*
au nombre de paires de pôles, *p;*
au nombre de conducteurs actifs de l'induit, N.

On l'exprime par la formule :

$$\boxed{E = k\, p\, n\, N\Phi} \quad \textit{volts}$$

Le coefficient *k*, que l'on nomme *coefficient de Kapp*, dépend du nombre des encoches par pôle et de leur écartement; il tient compte également de la loi de répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer. Sa valeur numérique est voisine de 2.

Parce que le coefficient *k* n'est pas le même pour des alternateurs de construction différente, la formule ci-dessus n'a pas grande utilité.

6. Réglage de la f. é. m. d'un alternateur.

Les nombres *k*, *p*, N de la formule

$$E = k\, p\, n\, N\Phi$$

sont fixes pour un alternateur déterminé.

La vitesse de rotation *n* a sa valeur imposée par la fréquence qu'il s'agit d'obtenir, on ne peut la mofifier pour régler E.

Reste Φ le flux inducteur. Il varie dans le même sens que le courant inducteur. *Augmenter ou diminuer ce courant est le seul moyen de réglage de la f. é. m. dont on dispose.*

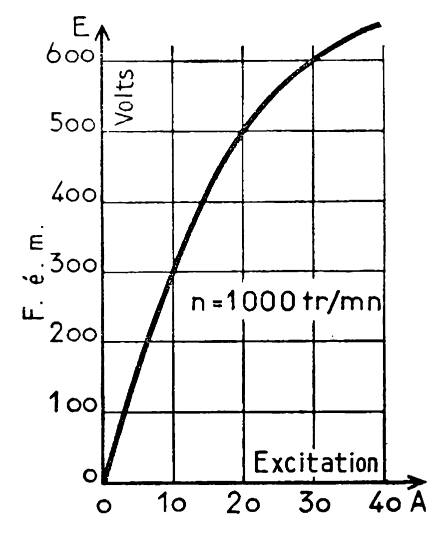


Fig. 10. — *Caractérisque à vide* d'un alternateur.

La ***caractéristique à vide*** d'un alternateur est la courbe de la f. é. m. de la machine en fonction du courant inducteur *i* (fig. 10), l'alternateur tournant à sa vitesse normale.

On remarque que cette caractéristique est semblable à la caractéris-

tique à vide d'une dynamo : l'une et l'autre sont la courbe de magnétisme $\Phi = f(i)$ de la machine.

Le courant continu inducteur peut être fourni par un réseau à courant continu, mais il est le plus souvent produit par une petite dynamo excitée en dérivation, nommée ***excitatrice***. L'induit de cette excitatrice est calé sur l'arbre de l'alternateur et tourne avec lui. Alternateur et excitatrice constitue ainsi un ensemble autonome.

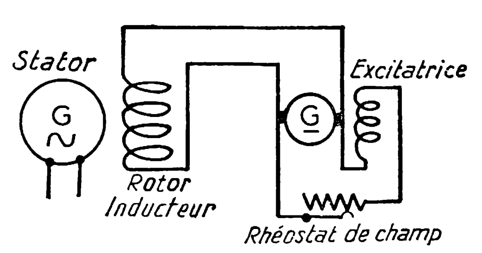


Fig. 11. — Le courant de l'alternateur est réglé par le rhéostat de champ de l'excitatrice.

Au lieu de placer un rhéostat de réglage en série avec les inducteurs de l'alternateur, on préfère souvent agir sur la f. é. m. de l'excitatrice à l'aide d'un rhéostat de champ (fig. 11). Le réglage s'effectue ainsi par la modification d'un courant peu intense, donc avec des pertes d'énergie minimes.

7. Caractéristiques en charge.

La tension aux bornes d'un alternateur à vide est égale à sa f. é. m.; lorsque l'alternateur débite dans un circuit extérieur la tension entre ses bornes varie. A vitesse constante et pour un courant inducteur donné, la réactance des récepteurs intervient en même temps que leur résistance pour modifier la tension, aussi la détermination des *caractéristiques en charge* est-elle compliquée.

Ces courbes, représentant la tension aux bornes U en fonction du courant débité I, sont relevées à vitesse constante, courant inducteur constant et pour un *facteur de puissance donnée* du circuit extérieur. La figure 12 représente trois courbes correspondant à des facteurs de puissance 1, 0,6 en avance et 0,6 en arrière.

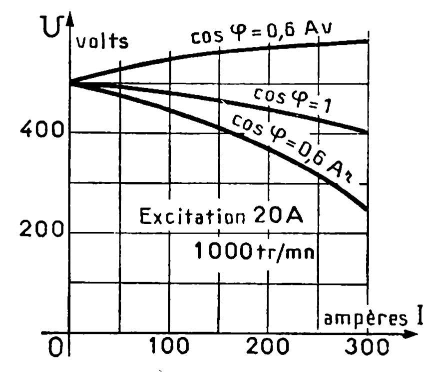


Fig. 12. — ***Caractéristiques en charge*** d'un alternateur. Elles sont relevées à vitesse constante, à excitation constante et à facteur de puissance constant.

Le *débit sur un circuit inductif* produit une *chute de tension importante*, au contraire le ***débit sur un circuit capacitif*** peut créer des *surtensions*.

Cette variation de la tension aux bornes de l'alternateur en charge est due en partie à la résistance de l'induit, mais surtout à la *réaction magnétique de l'induit*. En effet les ampères-tours produits par le courant circulant dans l'enroulement induit modifient le champ magnétique dans l'entrefer. Selon que les actions des *At* induits et des *At* inducteurs s'ajoutent ou se retranchent, on comprend que la tension aux bornes puisse augmenter (circuit capacitif) ou diminuer beaucoup (circuit inductif) par rapport à la tension à vide, due aux seuls *At* inducteurs.

Parce que les alternateurs sont souvent des machines très puissantes, l'*essai direct en charge est rarement possible*. Les électrotechniciens ont mis au point un certain nombre de méthodes, dites *diagrammes*, qui, à partir d'essais à vide ou à faible puissance, renseignent sur le fonctionnement en charge.

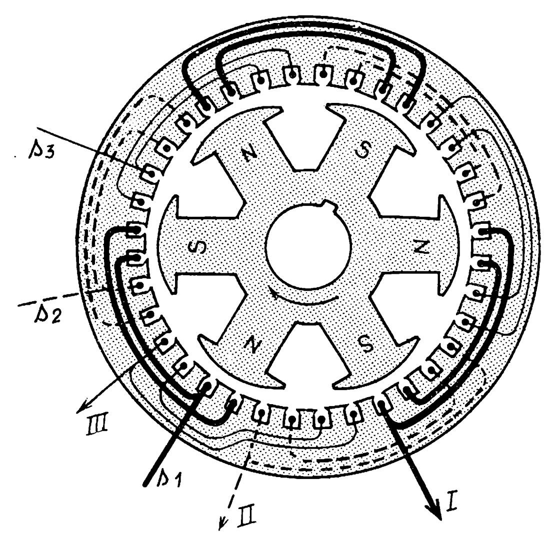


Fig. 13. — Deux enroulements ajoutés dans le stator de la figure 2 transforment la machine en ***alternateur triphasé***. (Les connexions entre bobines ne sont pas dessinées.)

B. Alternateurs polyphasés.

8. Alternateurs triphasés.

En examinant la figure 2 qui représente l'essentiel d'un alternateur monophasé, vous constatez qu'une grande partie de la surface intérieure du stator n'est pas occupée par l'enroulement. Il y a place pour y tailler 24 encoches en plus. On peut y loger deux autres enroulements identiques au premier (fig. 13). On obtient ainsi un alternateur qui fournit simultanément trois f. é. m. distinctes et égales. L'induit possède trois entrées et trois sorties.

Il n'y a aucune différence de propriétés entre les deux extrémités d'un circuit à courant alternatif. C'est arbitrairement que l'une des extrémités est nommée *entrée* et l'autre *sortie*. On peut intervertir les deux noms. Mais quand il s'agit de plusieurs circuits semblables, les extrémités analogues par leur place et le sens d'enroulement des conducteurs qui y aboutissent doivent être nommées de la même façon.

Pendant une période, le rotor tourne d'un double pas polaire, soit ici 120°. L'enroulement II est décalé de 30° par rapport à I; la f. é. m. induite dans cet enroulement passe par les mêmes valeurs que celle de l'enroulement I un tiers de période plus tard : *la f. é. m. de II est déphasée d'un tiers de période en arrière de la f. é. m. de I.*

De même l'enroulement III est identique aux deux autres, mais décalé de 30° en avant dans le sens du mouvement par rapport à l'enroulement II : *la f. é. m. de III est donc déphasée d'un tiers de période en arrière de la f. é. m. de II et de deux tiers de période en arrière de la f. é. m. de I.*

On donne à un tel alternateur le nom d'***alternateur triphasé.*** Il produit un ensemble de ***f. é. m. triphasées*** pouvant entretenir dans des circuits extérieurs des courants triphasés. Chacun des circuits est une ***phase*** de l'installation.

9. Enroulements triphasés.

L'induit d'un alternateur triphasé comporte donc *trois enroulements monophasés identiques,* mais *décalés l'un par rapport à l'autre d'un tiers du double pas polaire.*

La figure 14 représente le développement de l'enroulement triphasé

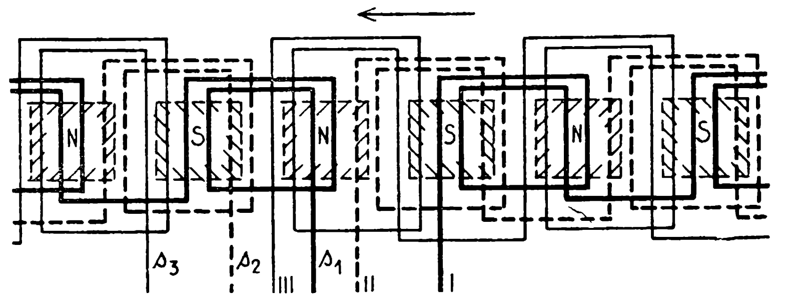


Fig. 14. — Développement d'un *enroulement de stator triphasé.* En réalité, les 12 bobines dessinées sont faites chacune de plusieurs tours de fil.

de l'alternateur à 6 pôles schématisé figure 14. Il a 2 encoches par pôle et par phase, dans chaque phase les 6 bobines sont associées en série. *Les trois phases peuvent être couplées en étoile ou en triangle.*

10. Donnons quelques dimensions d'un alternateur triphasé de petite taille.

Il s'agit d'un alternateur triphasé de 50 *kVA*, 210 *V* entre phases, 6 pôles, fréquence 50 *Hz.*

La couronne de tôles du ***stator*** a un diamètre extérieur de 470 *mm*, intérieur de

320 *mm*, une longueur de 200 *mm*. Elle porte 36 encoches, soit 2 par pôle et par phase. Les dimensions d'une encoche sont indiquées dans la figure 15.

Par encoche, il y a 16 conducteurs. Chaque conducteur est constitué par deux fils de 2,2 *mm* en parallèle.

Chaque phase comprend 6 bobines couplées par 2 en série et les 3 groupes en parallèle (fig. 16).

Les 3 phases sont montées en étoile avec neutre sorti.

Les 6 pôles du *rotor* sont entièrement feuilletés (fig. 17), deux plaques de fonte, visibles sur la figure 17, serrent chaque paquet de tôle. Les pôles sont montés à queue d'aronde sur le moyeu de l'inducteur.

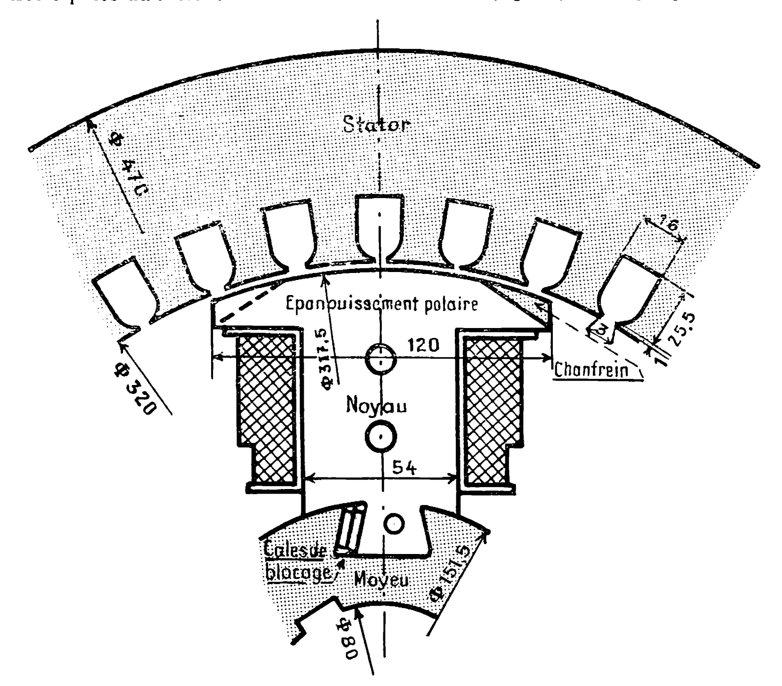


Fig. 15. — Stator et rotor d'un ***alternateur de 50 kVA*** à 6 pôles.

La largeur d'un noyau est 54 *mm*, sa longueur 225 *mm* et sa hauteur utile suivant un axe radial 60 *mm* non compris l'épanouissement polaire.

Le diamètre total de l'inducteur est 317,5 *mm*, ce qui donne à chaque entrefer une épaisseur de 1,25 *mm*.

La figure 17 montre la forme particulière de l'épanouissement polaire : deux chanfreins obliques, dont la largeur, nulle à une extrémité, atteint 27 *mm* à l'autre, laissent une surface polaire concentrique au stator, mais oblique par rapport aux génératrices du cylindre statorique. La surface utile totale des pièces polaires est environ les 2/3 de celle du stator.

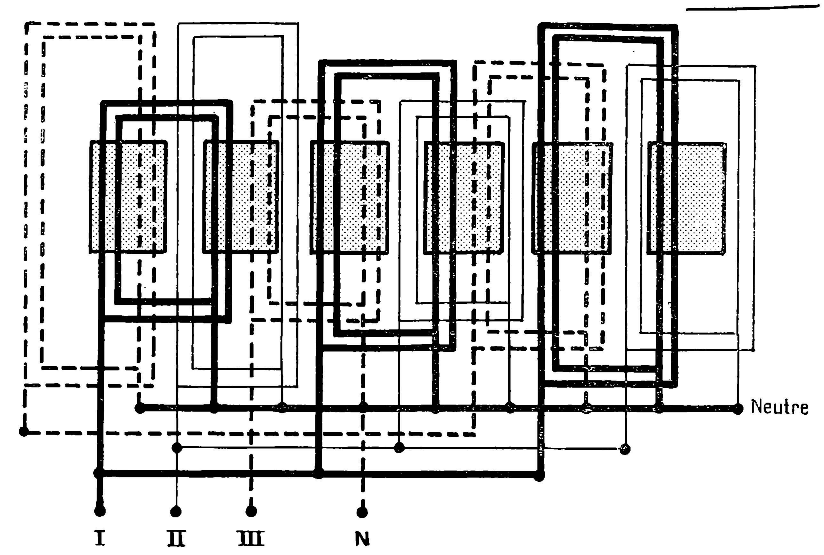


Fig. 16. — ***Bobinage du stator*** de l'alternateur ci-dessus : 2 encoches par pôle et par phase, 6 bobines par phase couplées par 2 en série et les 3 séries en parallèle. Les 3 phases sont connectées en étoile.

La bobine qui entoure chaque noyau polaire possède 37 spires faites d'une bande de cuivre de 1,2 × 20 *mm* enroulée sur champ. Les 6 bobines sont montées en série. Le courant y est amené par 2 bagues isolées de l'arbre.

L'*excitatrice*, montée en bout d'arbre, est une dynamo shunt à quatre pôles donnant 105 *A* sous 18 *V* à ses bornes.

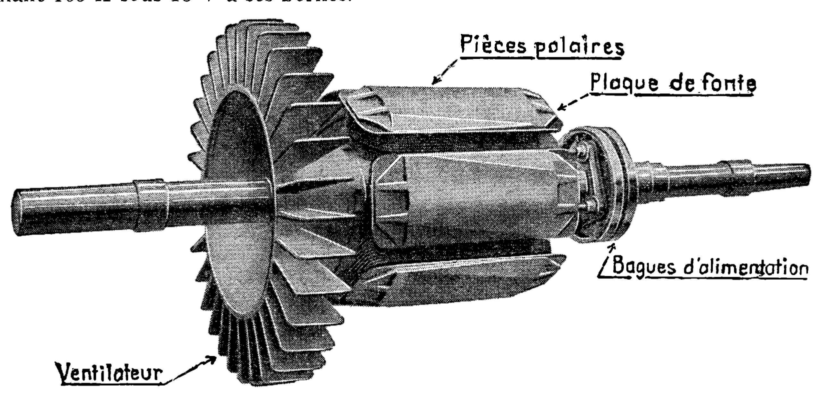


Fig. 17. — ***Rotor de l'alternateur*** des figures 15 et 16. Remarquer la forme des surfaces polaires, des deux bagues amenant le courant d'excitation et le ventilateur calé sur l'arbre.

11. Alternateurs diphasés.

Au lieu de 24 encoches supplémentaires dans le stator de l'alternateur de la figure 2, on peut n'en ajouter que 12, placées comme l'indique la figure 18 et y

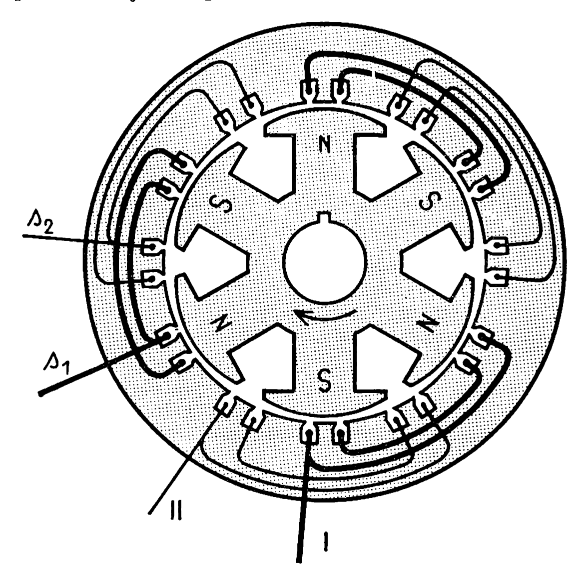


Fig. 18. — En ajoutant l'enroulement II, figuré en trait fin, on transforme l'alternateur de la figure 2 en ***alternateur diphasé.***

loger un second enroulement identique au premier mais décalé d'un demi-pas polaire. L'alternateur obtenu fournit deux f. é. m. égales, la *f. é. m. II étant déphasée d'un quart de période en arrière de la f. é. m. I.* On donne à ce type d'enroulements le nom d'***enroulement diphasé.***

On construit peu d'alternateurs diphasés, mais quelques secteurs parisiens distribuant des courants diphasés, les enroulements diphasés sont d'usage courant pour les moteurs.

Exercices.

1. Un alternateur tourne à 600 *tr/mm* et fournit une tension de 50 *Hz.*

1° Combien a-t-il de pôles?

2° Quelle doit être sa vitesse pour que la fréquence devienne 42 1/3 *Hz*?

2. Quelle est la force centrifuge qui s'exerce sur une masse de 1 *g* placée à la périphérie de l'inducteur bipolaire d'un turbo-alternateur produisant du courant alternatif à la fréquence de 50 *Hz*? L'inducteur a 1 mètre de diamètre.

3. Les turbo-alternateurs tétrapolaires d'un grand paquebot fournissent du courant de 81 *Hz.* A quelle vitesse tournent-ils?

4. Un alternateur de 600 *kVA* débite à charge normale dans un réseau dont le facteur de puissance est 0,80. Les pertes se décomposent comme suit.

Hystérésis	3 655 *W*
Courants de Foucault	1 555 *W*
Pertes Joule dans l'induit	13 820 *W*
Excitation	12 100 *W*
Frottements et ventilation	9 000 *W*.

Quel est le rendement de l'alternateur?

5. L'enroulement du rotor d'un alternateur de 100 *kVA* a une résistance de 1,6 Ω. L'excitatrice, dont la résistance de l'induit est 0,125 Ω, fournit à pleine excitation une f.é.m. de 65 *V*.

Calculer :

1° l'intensité du courant inducteur;

2° la puissance débitée par l'excitatrice;

3° le pourcentage, par rapport à la puissance de l'alternateur, de la puissance consommée pour l'excitation quand l'alternateur débite 100 *kVA* dans une installation dont le facteur de puissance est 0,8.

6. Le flux total Φ dans l'entrefer, sous un pôle d'un alternateur à 6 pôles donnant 50 *Hz*, est 0,017 *weber*. 64 conducteurs en série dans l'induit produisent une f.é.m. efficace de 121 *volts*. Calculer la valeur correspondante du coefficient de Kapp, *k*, de la formule :

$$E = kpnN\,\Phi \text{ volts.}$$

7. Calculer la densité du courant à pleine charge, pour un cos φ égal à 0,80, dans les conducteurs du stator de l'alternateur décrit au paragraphe 10 de la 23e leçon.

Pourquoi un ventilateur est-il monté sur l'arbre du rotor?

5. MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

24e LEÇON

Étude expérimentale d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

I. Examinons un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

Il comporte un inducteur fixe nommé ***stator*** et un induit mobile nommé ***rotor*** (fig. 1).

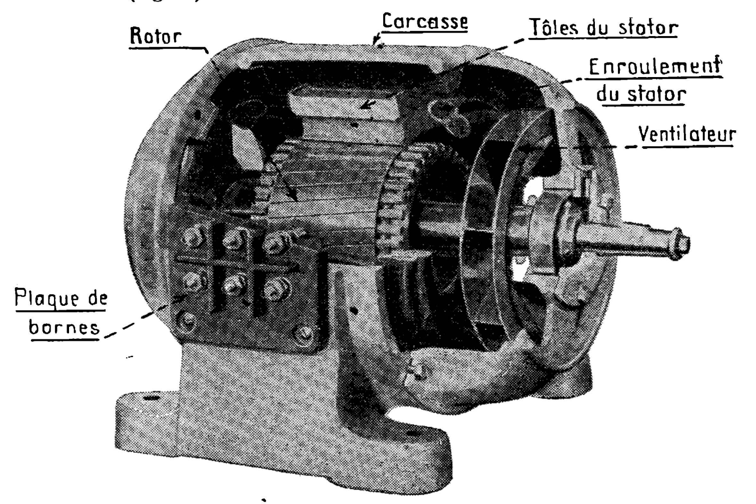


Fig. 1. — Vue intérieure d'un ***moteur asynchrone triphasé à rotor en cage d'écureuil.*** Le rotor est muni d'un ventilateur. Pourquoi?

Le ***stator*** est constitué par une couronne de tôles empilées. Ce sont des tôles minces (0,5 *mm*), de la qualité dite « supérieure ».

Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.

Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches ont été poinçonnées pour loger un *enroulement triphasé **identique à celui d'un alternateur***.

Comme un alternateur, un moteur asynchrone peut être ***bipolaire***, ***tétrapolaire***, **à** ***six pôles***, etc.

La figure 2 représente les enroulements d'un stator tétrapolaire. Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque de bornes (fig. 3). Vous remarquerez le décalage des sorties sur les entrées

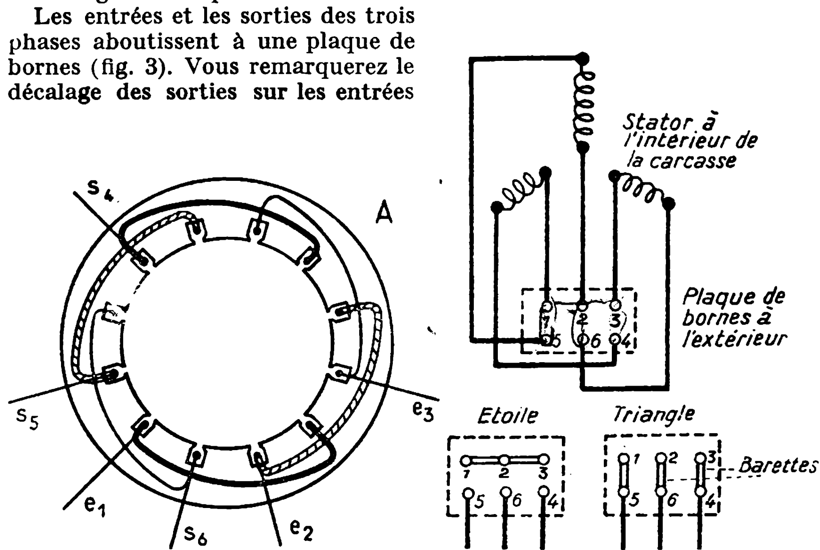


Fig. 2. — Schéma d'un ***stator à quatre pôles***.

Fig. 3. — ***Plaque de bornes*** d'un moteur asynchrone.

qui rend très facile le couplage des enroulements soit en ***étoile***, soit en *triangle*.

Le ***rotor***, claveté sur l'arbre du moteur, est un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées dans les tôles près de la surface extérieure du cylindre. Une tige de cuivre passe dans chaque encoche, toutes ces tiges sont réunies entre elles par une couronne de cuivre à chaque extrémité du rotor. L'ensemble des conducteurs, considéré sans la carcasse, a ainsi l'aspect d'une cage d'écureuil (fig. 4).

La cage de beaucoup de moteurs de construction moderne est coulée en aluminium d'une seule pièce.

L'***entrefer*** entre le stator et le rotor est *très faible*, de l'ordre du demi-millimètre. Il en est ainsi de tous les moteurs asynchrones pour diminuer la puissance réactive absorbée et augmenter le facteur de puissance.

Pour préciser, le stator du moteur de 4 *ch*, 200 *V*, 50 *Hz*, qui nous servira dans cette leçon, a un diamètre extérieur de 216 *mm*, un diamètre intérieur de 138 *mm*, et une longueur de 88 *mm*. Ses 24 encoches de 14 × 18 *mm* sont très peu ouvertes, juste assez pour passer les fils lors de l'exécution du bobinage.

L'enroulement se compose de 12 bobines, soit 4 par phase. Chaque bobine est faite de 54 spires de fil émaillé dont le diamètre est 1,3 *mm*.

Le rotor a une longueur de 88 *mm* et un diamètre de 137,2 *mm*. L'entrefer stator-rotor n'a donc que 0,4 *mm*.

Le rotor possède 41 encoches. Leur diamètre est 6,3 *mm*. Une encoche forme un

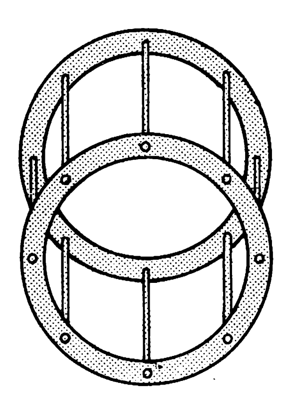


Fig. 4. — Conducteurs d'un ***rotor en cage d'écureuil.*** La figure 1 montre qu'en réalité le nombre de barres est beaucoup plus grand que sur ce dessin simplifié.

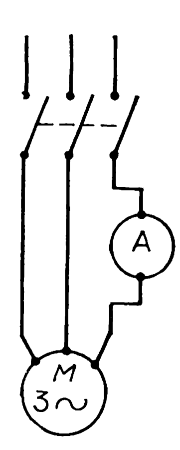


Fig. 5. — Schéma de ***branchement d'un moteur à cage d'écureuil.***

tube dont l'axe est une hélice à grand pas, tournant, sur la longueur du rotor, de l'intervalle entre deux encoches. Le passage des barres de la cage d'écureuil sous les encoches du stator est ainsi rendu progressif (voir fig. 1). Rotor et stator ont des nombres d'encoches différents pour éviter les points morts, c'est-à-dire les positions pour lesquelles le couple moteur est très faible.

Dans les encoches non isolées passent des barres de cuivre de 5,8 *mm* de diamètre. La section des couronnes de cuivre dans lesquelles les barres sont rivées et brasées sur chaque joue de l'induit est de 120 mm^2.

Remarquons combien cette construction d'un moteur à cage d'écureuil est simple et robuste; une telle machine est beaucoup moins fragile qu'un moteur à courant continu.

2. Démarrage. Sens de rotation.

a) Nous nous servons d'un moteur asynchrone triphasé 200 — 350 *V*. Le réseau étant à 200 *V* entre phases, on réalise (fig. 5) un montage

en triangle et l'on y amène le courant du réseau en plaçant un interrupteur triphasé sur la ligne. Ce montage est donc très simple.

b) En fermant l'interrupteur, le moteur démarre. Il est à vide et le démarrage est rapide. Pourtant, pendant un temps fort court, *l'intensité absorbée est grande*. Avec un ampèremètre dont on peut faire varier la position de départ de l'aiguille à volonté[1], nous constatons que cette intensité de démarrage atteint environ cinq fois l'intensité normale en charge. C'est pourquoi les moteurs à cage d'écureuil de plus de 2 ou 3 *ch* sont proscrits par les secteurs qui assurent, en même temps que la distribution de force motrice, un service d'éclairage.

c) Repérons le sens de rotation du moteur. Intervertissons deux fils de ligne aux bornes du moteur : le sens de rotation est changé. D'où la règle importante : ***on change le sens de rotation d'un moteur asynchrone en intervertissant deux fils de ligne.***

REMARQUE. — C'est seulement le stator d'un moteur asynchrone qui est alimenté par le réseau. Les courants dans le rotor sont produits par induction. Aussi donne-t-on quelquefois à ces moteurs le nom de *moteurs d'induction*. Les expressions *moteurs asynchrones à cage d'écureuil* et *moteurs d'induction à cage ou en court-circuit* sont synonymes.

3. Vitesse à vide d'un moteur asynchrone.

a) La vitesse du moteur étudié, à vide, alimenté à 200 *V*, 50 *p/s* est 1 490 *tr/mn*.

b) De quelles variables dépend cette vitesse?

1° Modifions la *tension* entre phases du courant d'alimentation : pour 175 *V*, 200 *V*, 225 *V*, la vitesse reste 1 490 *tr/mn*. *Donc la vitesse à vide est indépendante des variations de tension.*

2° Changeons la *fréquence* du courant :
pour 50 *p/s*, la vitesse à vide est 1 490 *tr/mn*,
pour 40 *p/s*, elle est 1 190 *tr/mn*,
pour 60 *p/s*, elle devient 1 790 *tr/mn*.

Donc *la vitesse est à vide proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation.*

3° La vitesse dépend du nombre de pôles du stator, elle ne dépend pas de la construction du rotor.

Dans un catalogue de constructeur de moteurs asynchrones, nous lisons que la vitesse en charge d'un moteur de 10 *ch* par exemple pour la fréquence standard 50 *p/s*, et quelle que soit sa tension, est :

2 900 *tr/mn*	si le moteur a	2 pôles,
1 410 *tr/mn*	—	4 pôles,
950 *tr/mn*	—	6 pôles,
710 *tr/mn*	—	8 pôles, etc.

1. On cale, par exemple, l'aiguille devant la division 10 *A*, pour l'empêcher de revenir au zéro, mais non pour l'empêcher de dévier davantage.

Or, nous savons que pour fournir la fréquence 50 *p/s*, un alternateur doit tourner à

3 000 *tr/mn* s'il a 2 pôles,
1 500 *tr/mn* s'il a 4 pôles,
1 000 *tr/mn* s'il a 6 pôles,
750 *tr/mn* s'il a 8 pôles, etc.

Donc, *la vitesse d'un moteur asynchrone est un peu inférieure à la vitesse d'un alternateur qui aurait le même nombre de pôles et qui fournirait du courant à la fréquence d'alimentation du moteur.*

c) On nomme ***vitesse de synchronisme*** cette vitesse de l'alternateur. Représentons-la par N et soit N′ la vitesse du moteur asynchrone. On appelle ***glissement*** du moteur le rapport :

$$g = \frac{N - N'}{N}$$

de l'excès de la vitesse de synchronisme sur la vitesse du moteur à la vitesse de synchronisme.

Par exemple, le glissement à vide du moteur étudié est :

$$g = \frac{1\,500 - 1\,490}{1\,500} = 0{,}006\,6.$$

Le glissement s'exprime en centièmes ou en tant pour cent : le glissement, à vide, du moteur étudié est 0,66 centièmes ou 0,66 %.

4. Rendement d'un moteur asynchrone, à cage, en charge.

Réalisons le montage schématisé figure 6. Le moteur entraîne une dynamo shunt qui débite dans un rhéostat. En faisant varier le débit de la génératrice, nous modifierons la charge du moteur. Un ampèremètre, un voltmètre, un wattmètre servent à mesurer la puissance apparente et la puissance active fournies au moteur.

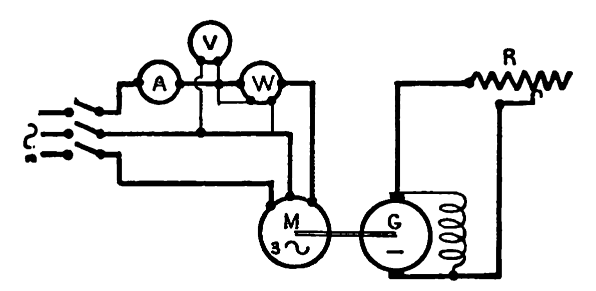


Fig. 6. — Schéma de l'installation d'un moteur pour l'étude en charge. Remarquer le symbole figurant un moteur asynchrone triphasé à cage.

Le rendement de la machine est le rapport de la puissance mécanique disponible sur l'arbre P_u, à la puissance électrique P_f fournie au stator :

$$\eta = \frac{P_u}{P_f}.$$

On calcule la puissance utile P_u en déduisant de la puissance fournie P_f la puissance perdue *p* que l'on évalue par la méthode des pertes séparées.

Les pertes se répartissent en :

pertes que l'on admet être indépendantes de la charge : ce sont les pertes par frottement et les pertes magnétiques par hystérésis et courants de Foucault ;

pertes variables avec la charge : ce sont les pertes en chaleur Joule dans le circuit du stator et dans celui du rotor.

La résistance ohmique entre phases du stator du moteur étudié, mesurée avec un ampèremètre et un voltmètre, est R = 1 ohm[1].

a) Le ***moteur tournant à vide***, sous sa tension normale de 200 volts, absorbe 300 watts et 6,4 ampères.

La perte en chaleur Joule dans le stator, qu'il soit couplé en étoile ou en triangle[2], est : $\frac{3}{2}RI^2 = 1{,}5 \times 6{,}4^2 = 61$ watts.

On admet que le surplus de la puissance absorbée, soit 239 watts, représente les pertes mécaniques et magnétiques, c'est-à-dire les *pertes constantes*. Les pertes en chaleur Joule dans le rotor, qui sont, comme nous le montrerons plus loin[3], proportionnelles au glissement, sont en effet négligeables à vide.

***b*) A pleine charge, le moteur**, sous 200 volts, absorbe 14 ampères et 3 950 watts. Il tourne alors à 1 420 tours par minute.

Le glissement est $\frac{1\,500 - 1\,420}{1\,500} = 0{,}053$, soit 5,3 %.

Dans le stator, il se perd en chaleur Joule :

$$1{,}5 \times \overline{14}^2 = 294 \text{ watts.}$$

La puissance transmise au rotor est sensiblement :

$$3\,950 - 239 - 294 = 3\,417 \text{ watts.}$$

Les pertes en chaleur Joule dans le rotor sont égales au produit du glissement[4] par la puissance reçue par le rotor, soit :

$$3\,417 \times 0{,}053 = 182 \text{ watts.}$$

---

1. Cette résistance doit être mesurée après que le moteur a fonctionné assez longtemps en charge (3h) pour atteindre sa température de régime.
2. Voir l'exercice 2 à la suite de la présente leçon.
3. Voir 25e leçon paragraphe 6.
4. Ceci sera démontré dans la leçon suivante. La valeur calculée ici est un peu trop faible parce que la puissance transmise au rotor devrait comprendre les pertes mécaniques qui en sont déduites à tort dans cette méthode simple.

En résumé, les pertes sont :

1° pertes constantes, mécaniques et magnétiques . . . . 239 W
2° pertes dans le cuivre du stator . . . . 294 W
3° pertes dans le cuivre du rotor. . . . . 182 W

Au total . . . . 715 W

La puissance utile à la poulie est :

$$P_u = 3\,950 - 715 = 3\,235 \text{ W}$$

et le rendement en pleine charge :

$$\eta = \frac{3\,235}{3\,950} = 0{,}82.$$

5. Étude du moteur à demi-charge, charge normale et surcharge.

Les différentes mesures faites sur le moteur, à vide et en charge, ont donné les valeurs suivantes :

Le moteur fonctionne :	U_s	I_s	P_t	N	f
à vide.	200 *V*	6,4 *A*	300 *W*	1 490 *tr/mn*	50 *p/s*
demi-charge . .	200 —	7,8 —	1 700	1 470	50
charge normale.	200 —	14,0 —	3 950	1 420	50
surcharge . . .	200 —	20,0 —	5 550	1 375	50

U_s est la tension entre phases du stator; I_s, l'intensité en ligne; P_t, la puissance absorbée; N, la vitesse en tours par minute.

Calculons, pour chaque régime de marche, le facteur de puissance, $\cos\varphi$, du moteur, le glissement g, le rendement η, la puissance utile P_u et le couple M[1] en mètres-kilogrammes sur l'arbre. Nous obtenons les résultats suivants :

Le moteur fonctionne :	$\cos\varphi$	g	η	P_u	M
à vide.	0,13	0,006	0	0 *W*	0 *m.kgf*
demi-charge . .	0,62	0,013	0,79	1 350	0,89
charge normale.	0,81	0,053	0,82	3 235	2,21
surcharge . . .	0,80	0,084	0,78	4 315	3,01

1. Rappelons que la puissance utile P_u, le couple moteur M et la vitesse de rotation N en tours par minute du moteur sont liés par la relation $P_u = \frac{2\pi N}{60} M$. Pour obtenir M en mètres-kilogrammes, il faut exprimer P_u en kilogrammètres par seconde.

Traçons les courbes de ces différentes grandeurs en fonction de la puissance utile en y ajoutant celle de la vitesse (fig. 7).

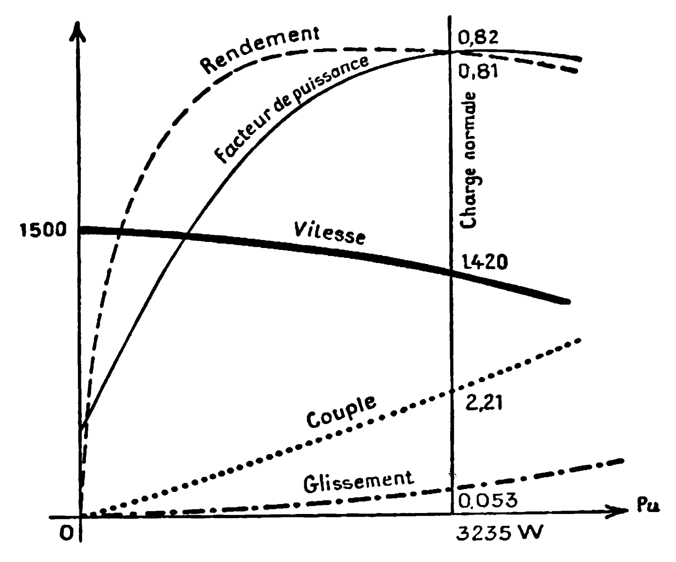


Fig. 7. — Courbes de fonctionnement d'un moteur à cage à diverses charges.

La figure obtenue met en évidence quelques-unes des propriétés essentielles du moteur d'induction à cage d'écureuil :

1° *Facteur de puissance.* — Sa valeur baisse beaucoup quand la charge diminue. Il faut donc éviter d'installer des moteurs plus puissants qu'il n'est nécessaire.

2° *Rendement.* — Le rendement est bon à partir de la demi-charge.

3° *Vitesse.* — La vitesse décroît quand la charge augmente. Toutefois la variation est faible puisqu'elle est seulement de 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. Le glissement des gros moteurs est plus faible encore.

C'est parce que les moteurs d'induction n'ont pas une vitesse rigoureusement constante et surtout parce que cette vitesse ne résulte pas seulement de la fréquence du courant d'alimentation qu'on les nomme *moteurs asynchrones*.

Mais une variation de la vitesse de 2 à 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge est négligeable dans la plupart des cas d'emplois industriels de moteurs. Pratiquement, on peut admettre que la vitesse d'un moteur asynchrone est toujours la même. A la fréquence standard

de 50 *p/s*, la gamme des vitesses possibles ne comprend que les valeurs voisines des vitesses de synchronisme : 3 000, 1 500, 1 000, 750 *tr/mn*, etc.

6. Conclusion : les moteurs asynchrones sont les moteurs électriques les plus employés.

En résumé :

1° les *qualités des moteurs d'induction à cage d'écureuil* sont :
la robustesse de leur construction,
la facilité de leur branchement,
la simplicité de leur mode de changement de sens de rotation,
le peu de variabilité de la vitesse par rapport à la charge,
les valeurs élevées du facteur de puissance et du rendement à charge normale;

2° leurs *défauts sont :*
la gamme restreinte des vitesses possibles; cette gamme est surtout insuffisante au-dessus de 1 000 *tr/mn*.
la grande intensité absorbée au démarrage,
la faiblesse du couple au démarrage,
la valeur trop faible du facteur de puissance à charge réduite.

En employant, soit des rotors bobinés à bagues, soit des rotors à double cage, en effectuant le démarrage avec un auto-transformateur ou un commutateur étoile-triangle, on corrige plus ou moins ces défauts.

La plupart des petits moteurs de commande individuelle des machines-outils sont des moteurs à cage d'écureuil; la plupart des moteurs industriels plus puissants sont des moteurs à bagues.

Exercices.

1. Avec un inverseur tripolaire, on peut monter un moteur d'induction triphasé pour qu'il tourne à volonté dans un sens ou dans l'autre.
Faire le schéma du branchement.

2. La résistance entre phases du stator d'un moteur asynchrone triphasé est 0,36 Ω.
L'intensité du courant en ligne à pleine charge est 50 *A*.
Calculer les pertes en chaleur Joule dans le stator :
1° s'il est couplé en étoile,
2° s'il est couplé en triangle.
Généraliser le problème en désignant par R la résistance entre phases et par I le courant en ligne.

3. Calculer l'intensité absorbée à pleine charge par un moteur asynchrone triphasé de 50 *ch*, 550 *V*, dont le rendement est 0,87 et le facteur de puissance 0,85.

4. La vitesse en charge d'un moteur asynchrone triphasé alimenté par du courant à 50 *p/s* est 720 *tr/mn*. Quel est le nombre de pôles et quel est le glissement du moteur?

5. **Un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à 120 *V*, 50 *p/s*, a donné aux essais :**

A vide	U_s = 118 *V*,	I_s = 9,8 *A*,	W = 305 *W*,	N = 1 490 *tr/mn*;
A faible charge. .	U_s = 120 *V*,	I_s = 15,25 *A*,	W = 2 460 *W*,	N = 1 460 *tr/mn*;
A charge normale.	U_s = 120 *V*,	I_s = 19,5 *A*,	W = 3 280 *W*,	N = 1 420 *tr/mn*;
En surcharge. . .	U_s = 124 *V*,	I_s = 23,25 *A*,	W = 4 070 *W*,	N = 1 374 *tr/mn*

Us est la tension entre fils de ligne; I_s, l'intensité en ligne; *W*, la puissance fournie au moteur; N, la vitesse; la résistance entre bornes du stator est 0,363 Ω.

Calculer pour chaque régime de marche
1° le glissement, *g*,
2° le facteur de puissance, cos φ,
3° le rendement, η,
4° la puissance utile, P_u,
5° le moment du couple moteur, M.
Tracer les courbes de *g*, cos φ, η, et M en fonction de la puissance utile.

6. Un moteur asynchrone triphasé a ses phases couplées en étoile. Il est alimenté par un réseau qui lui fournit par phase 149 A sous 550 *V* à la fréquence de 40 *p/s*. Le moteur est à 8 pôles; le glissement est 0,021; le facteur de puissance, 0,88. La puissance mesurée au frein à pleine charge atteint 113 *kW*.

On demande le rendement à pleine charge, les pertes et la vitesse du moteur.

7. Un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, 190 *V*, 50 *p/s*, 1 500 *tr/mn*, 5 *ch*, en étoile, ayant un rendement de 0,86 en pleine charge avec un facteur de puissance de 0,85, doit être rebobiné en aluminium.

Le stator comportait primitivement un enroulement en cuivre de 24 spires par phase et par pôle en fil de 19/10 *mm* de diamètre, la longueur moyenne d'une spire était 0,60 *m*.

On demande :

1° l'intensité du courant à pleine charge dans le moteur bobiné en cuivre;
2° la longueur totale du fil d'aluminium nécessaire au rebobinage;
3° le poids de ce fil;
4° la résistance d'une phase à 0° et la résistance à 75°;
5° l'intensité à admettre pour que l'échauffement reste le même qu'avec l'ancien bobinage;
6° le rendement à pleine charge du moteur ainsi transformé, en admettant que le facteur de puissance reste inchangé;
7° la puissance utile du moteur à pleine charge.

La résistivité du cuivre sera prise égale à 1,66 *microhm-centimètre*, celle de l'aluminium à 2,78. On admettra que l'échauffement du stator est le même, qu'il soit bobiné en cuivre ou en aluminium, si la puissance dissipée en chaleur Joule dans les enroulements est la même.

Brevet professionnel. Nancy.

Théorie élémentaire du moteur asynchrone triphasé.

I. Champ magnétique tournant.

1. Étudions le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un moteur par les courants triphasés statoriques.

Pour simplifier notre étude, envisageons d'abord le cas d'un ***stator bipolaire.*** Le bobinage est schématisé figure 1; les axes des bobines correspondant aux trois phases sont à 120° l'un de l'autre.

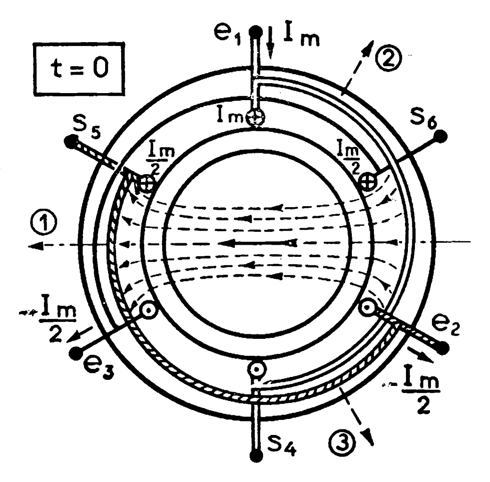


Fig. 1. — Représentation schématique d'un bobinage de *stator bipolaire.* Les axes des bobines correspondant aux phases 1, 2 et 3 sont décalés de 120°. A l'instant t = 0 le courant est maximum dans la phase 1. Nous aurons la même distribution des courants lorsque t = T.

Ces bobines sont parcourus par des courants triphasés. Si nous choisissons comme *origine des temps* l'instant où l'intensité est maximum dans la phase 1, les courants dans les trois phases sont représentés en fonction du temps figure 2. Les courants sont comptés positivement dans le sens entrée-sortie des bobines.

Indiquons, sur la figure 1, les sens et les intensités des courants dans les divers conducteurs *à l'instant initial.*

A cet instant $t = 0$: $i_1 = +\,I_m$, $i_2 = -\frac{I_m}{2}$, $i_3 = -\frac{I_m}{2}$; si

nous examinons la distribution des courants dans les conducteurs placés

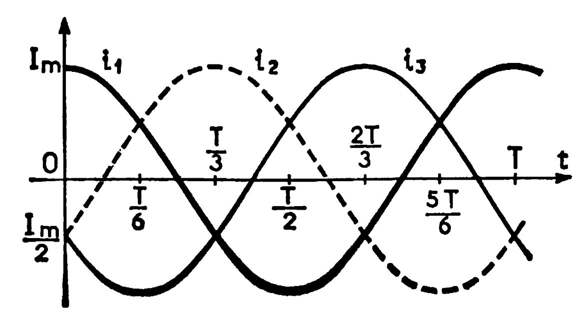


Fig. 2. — Représentation de la variation en fonction du temps des courants dans les phases 1, 2 et 3. Lorsque le courant est maximum dans une phase, il est égal à I $_m$: 2 et de sens contraire dans les deux autres phases.

à la périphérie de l'entrefer, nous constatons qu'ils engendrent un champ magnétique dirigé suivant l'axe de la bobine 1.

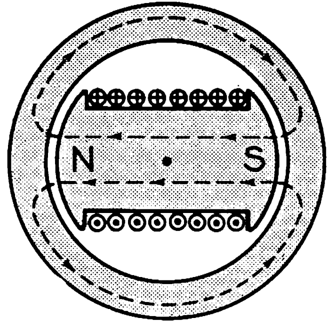


Fig. 3. — L'inducteur d'alternateur bipolaire ci-dessus produit dans l'entrefer le même champ magnétique que les trois enroulements triphasés de la figure 1.

C'est le champ que produirait l'inducteur d'un alternateur bipolaire (fig. 3).

2. Comment ce champ évolue-t-il dans le temps ?

Les courants dans les différentes phases sont des fonctions périodiques du temps, le champ qu'ils produisent se modifiera périodiquement. Étudions cette évolution.

A l'instant $t = \frac{T}{6}$ (fig.4) : $i_1 = + \frac{I_m}{2}$,

$$i_2 = - I_m, \quad i_3 = + \frac{I_m}{2}.$$

La distribution des courants se déduit de celle de la figure 1 par une rotation de 60° dans le sens de succession des phases. Le champ magnétique a donc tourné dans l'espace de 60°, comme l'aurait fait le champ d'un alternateur bipolaire dont l'inducteur aurait tourné du même angle.

Regardons les figures 5, 6 et 7 elles représentent les courants dans les conducteurs aux instants T : 3, T : 2 et 2 T : 3. Nous constatons que la distribution des courants, et nécessairement le champ magnétique produit, tourne régulièrement dans le sens où nous rencontrons les

phases 1, 2 3. Les courants ayant à l'instant T les mêmes valeurs qu'à l'instant zéro, l'ensemble effectue un tour en une période.

A la fréquence 50 *p/s*, la vitesse de rotation est 50 *tr/s*, soit 3 000 *tr/mn*;

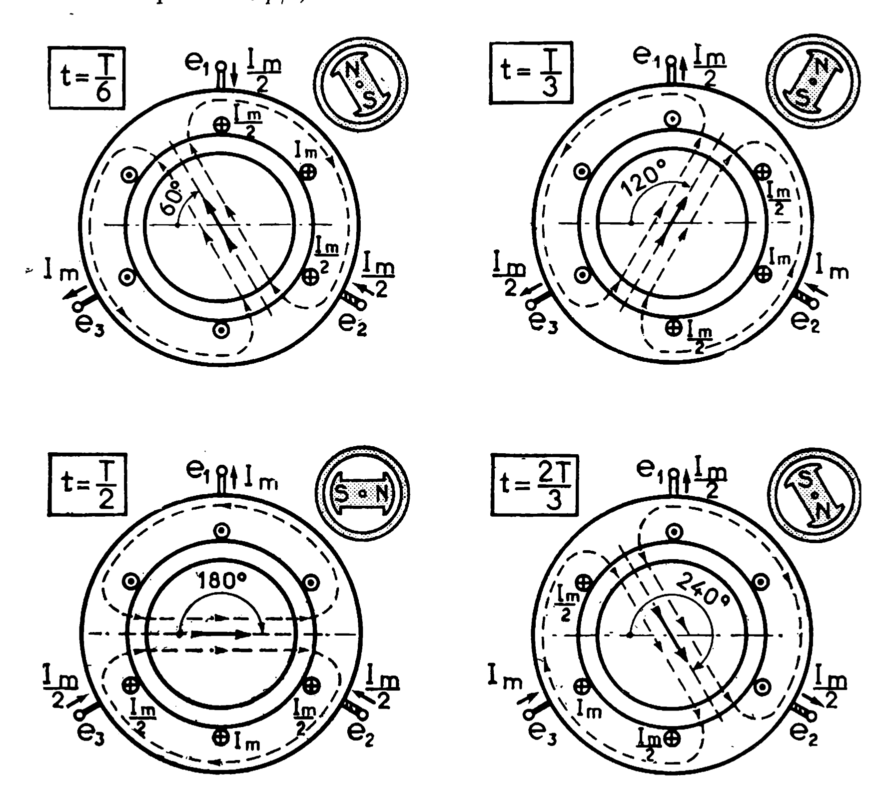


Fig. 4 -5-6 et 7. — A l'instant T : 6 les courants ont tourné de 60° par rapport à la figure 1 (temps t = 0); le champ magnétique aussi.
La distribution des courants dans les conducteurs tourne régulièrement de 60° en 1/6 de période.
Remarquez que les lignes d'induction entourent les conducteurs parcourus par des courants de même sens. Il en est de même sur la figure 3.

c'est la vitesse de l'alternateur bipolaire fournissant une fréquence de 50 *p/s*, soit la *vitesse de synchronisme*.

Si l'on intervertit les courants dans les bobines 2 et 3, on se rend compte facilement que le champ magnétique tourne en sens inverse du cas précédent.

3. Champ produit par un bobinage multipolaire.

La figure 8 représente le bobinage du stator du moteur qui nous a servi dans la leçon précédente; la distance angulaire entre les conducteurs équivalents de deux phases successives est 60°. C'est un enroulement qui conviendrait pour un alternateur à 4 pôles.

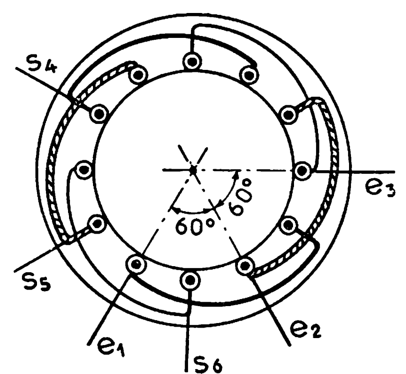


Fig. 8. — Enroulements du stator d'un moteur à 4 pôles.

Schématisons ce bobinage et représentons les courants dans les conducteurs à la périphérie de l'entrefer aux instants $t = 0$ (fig. 9, *a*) et $t = T : 6$ (fig. 9, *b*). La distribution des courants tourne de 30° en un temps T : 6; vous vérifierez facilement en traçant quelques figures qu'elle tourne de 180° en une période.

Les lignes d'induction du champ créé entourent les groupes de conducteurs parcourus par des courants de même sens; elles forment dans l'entrefer un champ magnétique identique à celui que produirait un

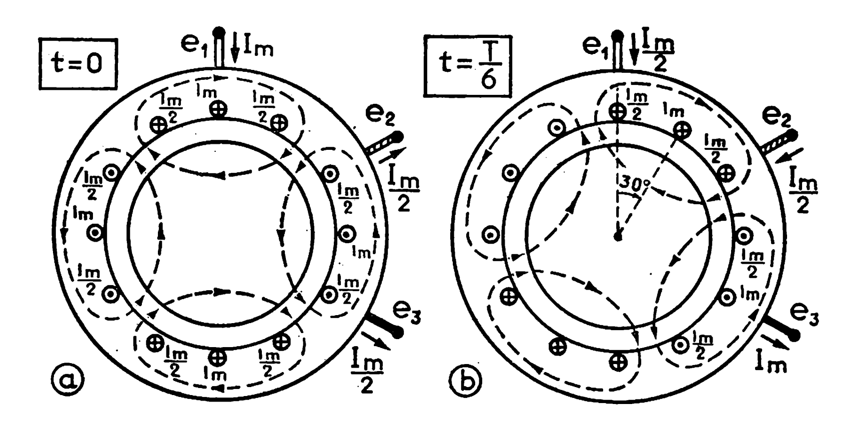


Fig. 9. — Distribution des courants dans les conducteurs d'un stator à 4 pôles aux instants — *a* : $t = 0$; — *b* : $t = T : 6$.
En 1/6 de période les courants et le champ tournent de 30°.

inducteur d'alternateur à 4 pôles (fig. 10). Ce champ accompagne dans sa rotation la distribution de courant qui l'engendre.

L'entrefer est donc le siège d'un champ magnétique à 4 pôles qui tourne de 180° en une période du courant.

Pour la fréquence 50 *p/s*, le champ tourne de 25 *tr/s*, soit 1 500 *tr/mn* : c'est encore la *vitesse de synchronisme*.

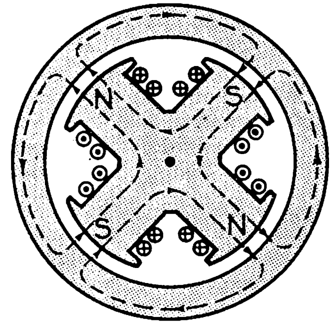


Fig. 10. — L'inducteur d'alternateur à 4 pôles ci-dessus produit le même champ que les enroulements triphasés de la figure 9. Remarquez que les lignes d'induction entourent encore les conducteurs parcourus par des courants de même sens.

En généralisant :

un bobinage triphasé, conçu pour un alternateur à 2 p pôles, engendre lorsqu'il est parcouru par des courants triphasés un champ à 2 p pôles tournant à la vitesse de synchronisme.

Nous avons étudié les champs tournants produits par les courants triphasés, car ce sont les plus utilisés.

Remarquons cependant qu'un enroulement diphasé parcouru par des ***courants diphasés*** engendre également un champ tournant.

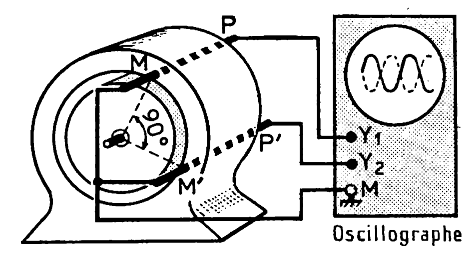


Fig. 11. — Deux conducteurs MP et M'P', décalés de 90°, sont le siège de *f. é. m. sinusoïdales* ***en opposition.*** Un champ tournant à 4 pôles glisse dans l'entrefer.

4. Vérifions expérimentalement ces résultats.

Utilisons le moteur à 4 pôles que nous avons essayé dans la leçon précédente. Noux voulons étudier le champ magnétique créé par le stator dans l'entrefer, pour éviter l'action des courants rotoriques enlevons le rotor[1] et remplaçons le par un cylindre fait de tôles empilées.

a) ***Existence du champ tournant.***

Plaçons dans l'entrefer, parallèlement à l'axe, deux conducteurs très fins MP et M'P'. Réunissons leurs extrémités à un oscillographe

1. On peut aussi l'entraîner à la vitesse de synchronisme.

à deux voies, c'est-à-dire permettant d'observer simultanément deux tensions (fig. 11).

Alimentons le stator, nous observons sur l'écran de l'oscillographe deux courbes qui représentent, en fonction du temps, les f. é. m. induites dans MP et M'P'. Ce sont des fonctions à peu près sinusoïdales de même fréquence; évidemment identiques lorsque MP et M'P' sont au même point de l'entrefer, elles *se déphasent* tout en gardant la *même amplitude* lorsqu'on écarte MP et M'P'.

Tout se passe donc bien comme dans l'entrefer d'un alternateur; MP et M'P' sont *balayés* ***successivement par un champ tournant.***

b) ***Nombre de pôles.***

Laissons MP fixe et plaçons M'P' en diverses régions de l'entrefer, le déphasage entre les f. é. m. dépend du décalage angulaire des deux conducteurs. En particulier :

— les deux f. é. m. sont *en opposition* si MP et M'P' sont à 90° l'un de l'autre;

— elles sont *en phase* si MP et M'P' sont diamétralement opposés.

Tout se passe comme si le champ d'entrefer était produit par un inducteur d'alternateur dont le *pas polaire* serait 90°, donc ***à 4 pôles.***

c) ***Sens et vitesse de rotation.***

Plaçons M'P' à 45° de MP : la f. é. m. induite dans M'P' est en *quadrature avance* sur celle induite dans MP.

Intervertissons deux fils de phase aux bornes du stator : la f. é. m. induite dans MP est en *quadrature retard*, montrant l'inversion du du sens de rotation du champ.

Enlevons M'P' et branchons sur la deuxième voie de l'oscillographe une tension simple du réseau alimentant le stator.

Comparons la fréquence de la f. é. m. induite dans MP et celle réseau, *ce sont les mêmes.*

Le champ tourne donc à la *vitesse de synchronisme.*

II. Théorie du fonctionnement d'un moteur asynchrone.

6. La production de courants induits dans le rotor et leurs actions électromagnétiques expliquent la rotation du rotor.

Les conducteurs du rotor, balayés par le champ tournant d'entrefer, sont le siège de f. é. m. induites. Le rotor étant en court-circuit, ces f. é. m. produisent des courants induits.

Ces courants placés dans le champ tournant sont soumis à des forces électromagnétiques. Ces forces produisent un couple qui fait tourner le rotor. Le sens de rotation est tel que, d'après la loi de Lenz, *la rotation s'oppose à la cause qui lui donne naissance.* Cette cause est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor.

Le rotor tourne donc pour rattraper le champ, soit dans le même sens que le champ.

Mais *il ne peut tourner aussi vite que le champ*; car il n'y aurait plus déplacement du champ par rapport au rotor, donc plus de courants induits et plus de couple moteur.

C'est parce que le mouvement du rotor n'est pas synchrone de celui du champ que ce moteur est dit *asynchrone.*

7. Les courants induits dans le rotor participent à la création du champ tournant d'entrefer.

Le stator du moteur est alimenté par le réseau mais le rotor n'a avec lui aucune liaison conductrice, il constitue en quelque sorte le secondaire d'un transformateur dont le stator serait le primaire. Comme dans un transformateur, les courants induits dans le secondaire (rotor) ont une action magnétisante : *le champ magnétique d'entrefer est créé par l'action simultanée des ampères-tours du stator et du rotor.*

Expérience. — Plaçons un conducteur très fin MP relié à un oscillographe dans l'entrefer d'un moteur asynchrone.

Alimentons le moteur sous sa tension normale et laissons le démarrer à vide. Lorsqu'il a pris sa vitesse de régime permanent, observons la f. é. m. induite dans MP; c'est une f. é. m. alternative à la fréquence du réseau comme lorsque les *At* statoriques agissaient seuls.

Chargeons progressivement le moteur, l'intensité dans le stator augmente et la vitesse du rotor diminue légèrement.

La f. é. m. induite dans MP reste invariable : fréquence et amplitude sont inchangées.

*Le champ d'entrefer est **indépendant de la charge,** il garde la même vitesse et la même amplitude lorsqu'on passe de la marche à vide à la marche en charge.*

Lorsque le moteur est *à vide,* le couple électromagnétique est très faible ainsi que les courants rotoriques. Le champ d'entrefer est produit uniquement par les courants statoriques.

Lorsqu'on charge le moteur, les courants rotoriques prennent naissance. Le champ ayant même amplitude à vide et en charge les courants du stator se modifient pour compenser les ampères-tours du rotor.

Comme dans un transformateur, *toute augmentation du courant dans le rotor entraîne une augmentation du courant dans le stator.* Dans le

moteur, l'augmentation du courant rotorique résulte de l'augmentation du couple résistant.

Cependant, différence importante avec le transformateur, le secondaire (rotor) n'est pas parcouru par des courants à la même fréquence que le primaire (stator).

8. Fréquence des courants dans le rotor.

Lorsque le champ tourne à la vitesse angulaire de synchronisme ω_s, le rotor tourne à la vitesse ω_r. La vitesse relative du champ par rapport aux conducteurs du rotor est $\omega_s - \omega_r = g\,\omega_s$, puisque les vitesses angulaires en *rad/s* sont proportionnelles aux vitesses de rotation en *tr/mn*.

Le champ tournant balaie ainsi les conducteurs du rotor g fois moins vite que ceux du stator : *la fréquence des f. é. m. et des courants induits dans le rotor est donc g fois celle du réseau.*

$$f_r = g \times f$$

En résumé, dans un moteur asynchrone à $2p$ pôles le champ d'entrefer tourne à la vitesse de synchronisme $\omega_s = \omega : p$, il est produit par :
— les courants à la fréquence f du réseau circulant dans le stator fixe;
— les courants à la fréquence $f_r = gf$ circulant dans le rotor qui tourne à la vitesse ω_r par rapport au stator .

Ce champ induit :
— *dans le stator*, à la fréquence f, des forces contre-électromotrices pratiquement égales à la tension d'alimentation, ce qui explique l'amplitude constante du champ d'entrefer;

— *dans le rotor* des forces électromotrices à la fréquence gf .

9. Couple moteur.

Suivons un conducteur du rotor pendant sa rotation.
L'induction magnétique qui agit sur lui varie sinusoïdalement en fonction du temps à la fréquence de glissement gf, le rotor glissant par rapport au champ d'entrefer d'un double pas polaire en une période du courant rotorique. La f. é. m. et l'intensité qui en résulte sont elles aussi des fonctions du temps de fréquence gf.

La f. é. m. Blv est en phase avec B; l'inductance du circuit rotorique déphase le courant en retard d'un angle α par rapport à la f. é. m. donc à B.
La force agissant sur le conducteur $F = Bi_rl$ est proportionnelle au produit de deux grandeurs sinusoïdales B et i_r de même fréquence déphasés de α. Cette force est donc variable avec le temps, sa valeur moyenne est proportionnelle au produit : $B_m I_r \cos\alpha$, dans lequel B_m désigne l'amplitude du champ d'entrefer et I_r la valeur efficace du courant rotorique.

Le ***couple moteur***, somme des moments des forces F par rapport à l'axe, est également proportionnel au produit $B_m I_r \cos\alpha$. Pour une tension d'alimentation donnée, il dépend seulement du produit $I_r \cos\alpha$, car B_m est constante.

L'angle α dépend des caractéristiques électriques du rotor : sa résistance R et son inductance de fuites L. On a $\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{\text{réactance}}{\text{résistance}} = \frac{gL\omega}{R}$.

Au décollage, $g = 1$, $\mathrm{tg}\,\alpha$ est grande, $\cos\alpha$ est faible; malgré une intensité rotorique assez importante *le couple de démarrage* C_d *est peu élevé.*

Pendant le démarrage, à mesure que la vitesse du rotor se rapproche de la vitesse de synchronisme, deux phénomènes, dont les effets sont opposés, se produisent simultanément :

1° l'intensité des courants rotoriques diminue et de ce fait le couple tend à décroître;

2° le glissement diminue, $\mathrm{tg}\,\alpha$ également, donc $\cos\alpha$ augmente, le couple tend à croître.

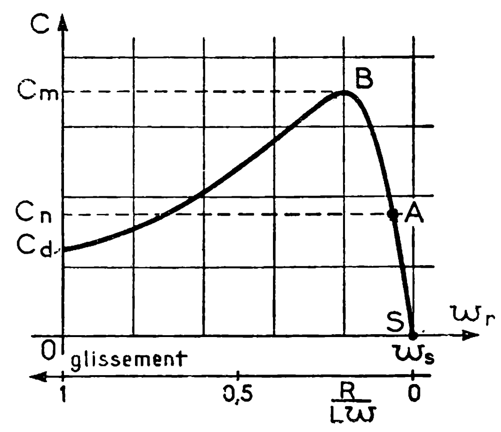


Fig. 12. — Variations du *couple d'un moteur* asynchrone en fonction de sa vitesse ω_r ou en fonction du glissement g; les deux échelles ω_r de 0 à ω_s et g de 1 à 0 sont en sens inverses.

La figure 12 représente les variations du couple quand la vitesse du rotor croît jusqu'à la vitesse de synchronisme, donc lorsque le glissement g décroît jusqu'à zéro. C'est la ***caractéristique mécanique*** du moteur.

On peut établir (nous ne ferons pas ce calcul) la formule suivante :

$$C = KU^2 \frac{R/g}{(R/g)^2 + (L\omega)^2} \qquad (1)$$

qui donne le couple en fonction de la tension d'alimentation U, du glissement g et des caractéristiques du rotor.

Le couple maximum correspond au moment où le glissement est égal à $R : L\omega$, donc lorsque $\omega_r = \left(1 - \frac{R}{L\omega}\right)\omega_s$. En effet la formule (1) peut s'écrire : $C = KU^2 \frac{R}{\frac{R^2}{g} + (L\omega)^2 g}$; le dénominateur comprend deux

termes dont le produit est constant, il est donc maximum lorsque ces deux termes sont égaux, soit lorsque $g = R : L\omega$.

Ce couple maximum a pour valeur : $C_m = KU^2 : 2\,L\omega$; *il est indépendant de la résistance du rotor.*

10. Puissance perdue par effet joule dans le rotor.

La puissance transmise au rotor P_s est égale à la puissance électrique fournie au stator diminuée des pertes dans le stator. Cette puissance est fournie au rotor par le champ tournant à la vitesse ω_s.

Soit C le couple qu'exerce par l'intermédiaire du champ tournant le stator sur le rotor, d'après le principe de l'action et de la réaction C est également le couple qu'exerce le rotor sur le stator. On a donc :

puissance transmise au rotor : $P_s = C\omega_s$
puissance fournie par le rotor : $P_m = C\omega_r$.

La puissance P_r perdue dans le rotor est :

$$P_r = P_s - P_m = C(\omega_s - \omega_r) = C\,\omega_s\,\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Or, $C\,\omega_s = P_s$ et $\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = g$, donc :

$$P_r = g \times P_s$$

Cette puissance est dépensée en chaleur Joule dans les conducteurs du rotor.

Le ***rendement du rotor*** est alors :

$$\eta_r = \frac{P_s - P_r}{P_s} = 1 - \frac{P_r}{P_s} = 1 - g.$$

11. Fonctionnement normal.

Le rendement du moteur est toujours plus petit que le rendement du rotor η_r; il est donc toujours plus petit que $1 - g$.

Cette machine n'est pratiquement utilisable que pour des glissements faibles; la partie utile de la caractéristique mécanique est donc SA (fig. 12). Le point A correspond au fonctionnement à la puissance nominale, le couple correspondant C_n est environ la moitié du couple maximum C_m.

Le moteur asynchrone est un moteur à faible chute de vitesse.

Lorsque le couple résistant dépasse accidentellement le couple maximum, le moteur cale. Généralement la surintensité importante fait fonctionner les dispositifs de sécurité avant même d'atteindre le couple maximum.

12. Un moteur à cage ne peut avoir un bon rendement et un bon couple de démarrage.

Pour qu'un moteur ait un rendement acceptable, il faut que le glisse-

ment pour le fonctionnement normal soit de quelques pour cent, donc que la résistance du rotor soit petite. Mais alors le couple au décollage C_d est faible.

La figure 13 représente quelques courbes du couple pour des résistances différentes du rotor. Elle montre que *pour obtenir un couple important au démarrage, il faut un rotor résistant.* Mais dans ces conditions le glissement en marche normale est grand et le rendement est faible.

Dans le cas d'un rotor à cage, dont la résistance est invariable, le constructeur tente de réaliser une solution de compromis entre ces deux conditions contraires; elle ne peut être parfaite.

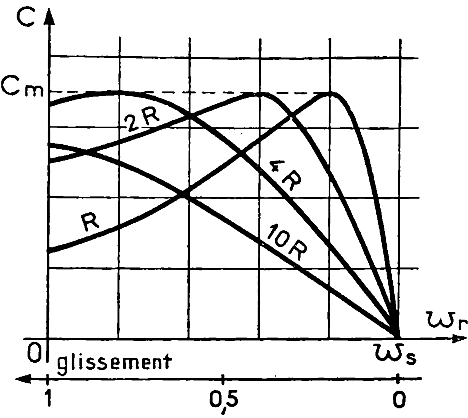


Fig. 13. — Courbes du couple C en fonction de la vitesse ω_r ou du glissement *g* pour des *résistances différentes du rotor.* Pour une tension d'alimentation donnée, le couple a même valeur pour des valeurs égales de R : *g*.

Le ***moteur à rotor bobiné*** résoud mieux ce problème, mais sa construction est plus onéreuse.

La carcasse du rotor porte des encoches, comme celle du stator, mais en nombre différent. Dans ces encoches sont logés, trois enroulements triphasés, en général couplés en étoile. Les trois extrémités libres aboutissent à trois bagues isolées sur l'arbre (fig. 14).

Avec trois balais frottant sur les bagues, on ajoute, au démarrage, à chaque phase du rotor, une résistance suffisante (10 à 15 fois celle de l'enroulement). Les trois résistances sont réunies dans un rhéostat et fractionnées en plusieurs parties connectées à trois arcs à plots. On les couple en étoile par une manette à trois frotteurs. Les résistances sont sorties graduellement du circuit du rotor pendant le démarrage. En marche normale, les trois bagues du rotor sont en court-circuit.

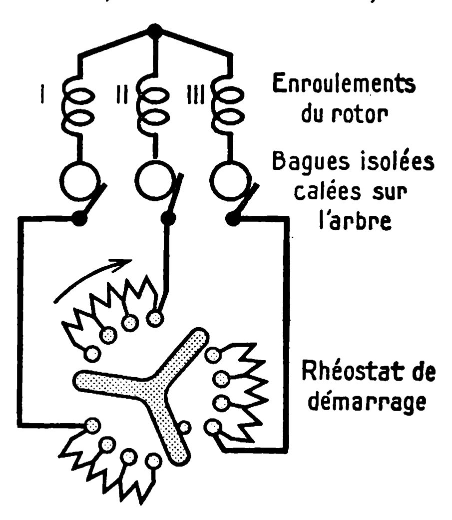


Fig. 14. — Schéma d'un *rotor bobiné* et du *rhéostat de démarrage.*

On peut ainsi concilier la nécessité d'une grande résistance du rotor au démarrage et celle d'une faible résistance en marche normale.

La plupart des moteurs asynchrones de moyenne et de grande puissance sont construits à rotor bobiné.

Exercices.

1. La figure 15 représente le schéma de bobinage d'un stator triphasé à 4 pôles. Compléter le schéma en traçant les phases 2 et 3 avec des crayons de couleur.

Comparer ce bobinage avec celui étudié dans les 23e et 24e leçon. Justifier les dénominations : bobinage à une bobine par pôle et par phase et bobinage à une bobine par paire de pôles et par phase de ces deux types de bobinage.

2. En comparant les dimensions et les prix de deux moteurs d'induction, à 50 *p/s*, de 10 *ch*, 200 *V*, l'un, dont la vitesse est 710 *tr/mn*, l'autre, de vitesse 2 900 *tr/mn*, on constate que le premier est beaucoup plus volumineux et beaucoup plus cher (plus du double), que le second. Expliquer ces faits.

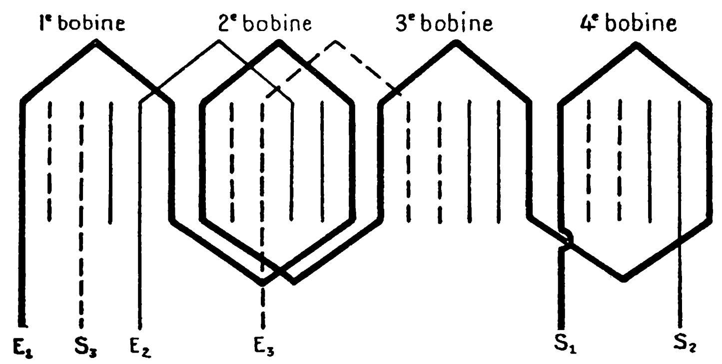


Fig. 15. — Bobinage d'un stator triphasé à 4 pôles.

3. Un moteur asynchrone triphasé à cage entraîne un ventilateur. Dans la zone de fonctionnement utile sa caractéristique mécanique est pratiquement une droite passant par le point 5 *m.kgf*, 950 *tr/mn*.

Le couple résistant du ventilateur est proportionnel au carré de la vitesse; à 500 *tr/mn* sa valeur est 1 *m.kgf*.

Déterminer la vitesse du groupe formé des deux machines.

4. La résistance du rotor par phase d'un moteur asynchrone à bagues est 0,1 Ω. Lorsque ce moteur est utilisé bagues en court-circuit sa caractéristique mécanique est :

N	0	500	1 000	1 350	1 450	1 500	*tr/mn.*
C	14	27	50	62	35	0	*mètres-newtons.*

Tracer point par point la caractéristique mécanique lorsqu'on place dans le rotor un rhéostat dont chaque phase a une résistance de 0,4 Ω.

Emploi des moteurs asynchrones triphasés.

Les moteurs asynchrones triphasés, et surtout les moteurs à cage, sont les moteurs électriques les plus employés; c'est pourquoi nous nous proposons d'en étudier les propriétés usuelles, notamment leurs modes de démarrage, l'intensité qu'ils absorbent et le couple qu'ils produisent au décollage.

Rappelons les propriétés suivantes que nous utiliserons au cours de la leçon :

1° Quand le stator est alimenté et que le rotor ne tourne pas, *un moteur asynchrone se comporte exactement comme un transformateur.*

2° Quand le moteur tourne, en désignant par P_s la puissance transmise par le stator au rotor et par g le glissement, les pertes en chaleur Joule dans le rotor ont pour valeur :

$$P_r = P_s \times g = P_s \times \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

ω_s est la vitesse de synchronisme et ω_r la vitesse du rotor en radians par seconde.

Sans grande erreur, on peut remplacer P_s dans cette expression soit par la puissance utile du moteur, soit par la puissance active qu'il absorbe[1].

3° La puissance d'un moteur est proportionnelle au carré de la tension appliquée à ses bornes, du moins tant que le fer du stator n'est pas saturé.

Puisque la vitesse d'un moteur asynchrone est à peu près constante pour une fréquence déterminée, le couple d'un tel moteur est aussi proportionnel au carré de la tension aux bornes.

A. MOTEURS A SIMPLE CAGE

DÉMARRAGE DIRECT

I. Le démarrage direct d'un moteur à cage produit un appel de courant considérable dans la ligne d'alimentation.

Reprenons le moteur tétrapolaire de 4 chevaux, 200 volts, 50 périodes par seconde, qui nous a servi au cours de la 24e leçon. Nous savons qu'il absorbe $I_n = 14$ ampères à pleine charge, que son glissement est alors $g = 0{,}053$ et nous avons calculé qu'il fournit un couple

1. Les calculs effectués dans cette leçon ne sont qu'approximatifs. Les résultats approchés obtenus suffisent dans les applications pratiques.

C_n = 2,21 *m.kgf* que son rendement est $\eta = 0{,}82$ et son facteur de puissance $\cos\varphi = 0{,}81$.

Expériences. — *a*) Branchons le moteur sur le réseau avec un interrupteur tripolaire et un ampèremètre du calibre de 100 ampères.

Fermons l'interrupteur. Le moteur démarre et parce qu'il est à vide, il atteint sa vitesse normale en une infime fraction de seconde : le démarrage est brutal.

L'aiguille de l'ampèremètre est lancée brusquement jusqu'à l'extrémité de l'échelle de l'appareil : l'intensité absorbée paraît grande au moment du *décollage*[1], mais dans les conditions de l'expérience, l'appréciation de sa valeur maximum est impossible. Le moteur démarré, l'ampèremètre indique l'intensité correspondant à la marche à vide : 6,4 ampères.

b) Cherchons à supprimer l'impulsion initiale donnée à l'aiguille. En poussant cette aiguille avec une butée qui l'empêche de retourner au zéro mais lui permet de se déplacer en sens opposé, nous la plaçons, après tâtonnements, en un point de l'échelle où l'intensité au décollage la fait à peine bouger. Nous obtenons ainsi la valeur I*dd*[2] de la *pointe d'intensité lors du démarrage direct*, nous trouvons $I_{dd} = 70$ ampères.

Cette pointe atteint 5 fois l'intensité normale : elle est considérable.

c) Appuyons sur la poulie du moteur une planche qui fait frein et démarrons-le ainsi chargé. La valeur du I_{dd} n'est pas changée. *La pointe d'intensité au démarrage est indépendante de la charge.*

d) L'intensité du courant absorbé lors du démarrage direct est la même que l'intensité dans le stator quand le rotor est calé. A défaut d'un ampèremètre à aiguille butée, on peut donc mesurer I_{dd} en calant le rotor et en alimentant le stator avec une tension qui est la moitié ou le tiers de la tension normale. Puisque l'intensité et la tension sont à peu près proportionnelles, il est facile de calculer I_{dd} correspondant à la tension normale.

Le rapport $I_{dd} : I_n$ dépend de la construction du moteur, les valeurs suivantes sont des valeurs moyennes :

Puissance utile nominale	0,4 à 0,75 kW	0,75 à 1,5 kW	1,5 à 5 kW	5 à 15 kW	Au-dessus de 15 kW
$I_{dd} : I_n$	3,7	3,1	2,5	1,6	1,35

Quand des lampes et des moteurs sont branchés sur les mêmes lignes d'alimentation, le courant intense au démarrage produit une chute de tension qui cause une diminution désagréable de la lumière émise. Aussi certains secteurs interdisent-ils, dans les installations alimentées

1. On nomme *décollage* le début de la période de démarrage.
2. Cette notation I_{dd} rappelle que c'est l'intensité au démarrage direct, c'est-à-dire par simple fermeture d'un interrupteur.

à basse tension, l'emploi du démarrage direct pour des moteurs à cage de plus de 2 chevaux.

2. Le couple au démarrage direct d'un moteur à cage est moins grand que ne le ferait supposer l'intensité du courant de pointe.

a) Le couple au décollage, C_{dd}, se mesure en bloquant sur la poulie du moteur les sabots d'un frein de Prony. On ferme l'interrupteur de ligne et on lit aussitôt l'indication du dynamomètre. L'opération doit être brève, car si le courant de démarrage durait plusieurs secondes il risquerait de détériorer l'enroulement du stator.

Pour ménager le moteur, on peut réduire la tension d'alimentation et admettre que le couple est proportionnel au carré de la tension.

Cette mesure, qui est un peu longue, est à faire pendant une séance d'essais de machines. Pour le moteur étudié, nous avons trouvé : $C_{dd} = 2{,}8\ m.kgf$.

b) Il est possible de calculer la valeur du couple de démarrage direct C_{dd} en fonction du couple normal C_n.

En marche normale en charge, les pertes en chaleur Joule dans le rotor sont :

$$P_r = P_s \times \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}.$$

Soit C le couple d'entraînement du rotor par le stator :

$$P_s = C\,\omega_s.$$

Donc : $$P_r = C(\omega_s - \omega_r). \qquad (1)$$

Si J_n est le courant dans le rotor en marche normale, nous pouvons écrire : $$P_r = RJ_n^2. \qquad (2)$$

le facteur R est la résistance du rotor.

La comparaison des relations (1) et (2) donne :

$$C(\omega_s - \omega_r) = RJ_n^2.$$

Or le couple C_n sur l'arbre du moteur n'est que peu inférieur au couple C, donc : $$C_n(\omega_s - \omega_r) \simeq RJ_n^2. \qquad (3)$$

Au démarrage, le couple est C_{dd}, ω_r est nul, J_d est le courant dans le rotor, la relation (3) devient :

$$C_{dd}\,\omega_s \simeq RJ_d^2. \qquad (4)$$

Les relations (3) et (4) fournissent le rapport :

$$\frac{C_{dd}}{C_n} \simeq \left(\frac{J_d}{J_n}\right)^2 \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

soit : $$C_{dd} \simeq C_n \cdot \left(\frac{J_d}{J_n}\right)^2 \cdot g.$$

Puisqu'un moteur asynchrone est assimilable à un transformateur, le rapport des intensités dans le rotor est à peu près égal à celui des

intensités dans le stator et à celui des intensités absorbées par le moteur :

$$C_{dd} \simeq C_n . \left(\frac{I_{dd}}{I_n}\right)^2 . g. \qquad (5)$$

Toutes les quantités qui figurent dans le second membre de cette expression peuvent être mesurées ou calculées.

Par exemple, pour le moteur de 4 *ch* étudié, le rapport $I_{dd} : I_n$ a été trouvé égal à 5, le glissement à charge normale est $g = 0{,}053$, donc :

$$C_{dd} \simeq C_n . 5^2 . 0{,}053 \simeq 1{,}33\ C_n.$$

Pour un courant de démarrage 5 fois plus grand que le courant normal, le couple au décollage n'est que les 4 : 3 du couple normal. C'est que *la puissance absorbée par un moteur à cage au cours du démarrage est surtout réactive,* de même que la puissance absorbée par un transformateur dont le secondaire est en court-circuit.

C'est dire que le cos φ du moteur est faible pendant le démarrage; il est de l'ordre de 0,2 et ne dépasse 0,3 que dans le cas de moteurs de construction spéciale, à cage très résistante.

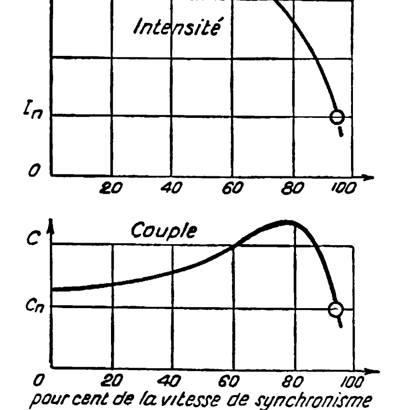


Fig. 1. — Variations du couple et de l'intensité au cours du démarrage direct d'un moteur à cage.

La figure 1 donne une idée des variations du couple et de l'intensité pendant le démarrage.

Remarquons que le couple et l'intensité de démarrage direct d'un moteur à cage sont indépendants de la machine qu'entraîne le moteur. Si cette machine travaille dès qu'elle commence à tourner ou si son inertie est grande, le démarrage est lent, mais les valeurs de C_{dd} et de I_{dd} ne sont pas changées. Elles sont les mêmes en charge qu'à vide et résultent de la constitution électrique et magnétique du type de moteur employé.

3. Conclusion.

En résumé, le démarrage direct d'un moteur à rotor en court-circuit provoque un appel de courant intense et produit un couple peu élevé compte tenu de l'intensité absorbée.

Mais il ne nécessite qu'un branchement très simple de trois fils avec un appareillage réduit à un seul interrupteur tripolaire. Il est facile à réaliser avec un contacteur[1].

1. Voir 34e *Leçon*.

DÉMARRAGE ÉTOILE-TRIANGLE

4. Principe du démarrage par couplage étoile-triangle.

Il consiste à *coupler les trois enroulements en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir le couplage en triangle quand le rotor a pris à peu près sa vitesse de régime.*

Ce démarrage n'est donc possible qu'avec un moteur asynchrone triphasé à cage construit pour fournir sa puissance normale, sous la tension U de la ligne, quand les trois enroulements de son stator sont couplés en triangle.

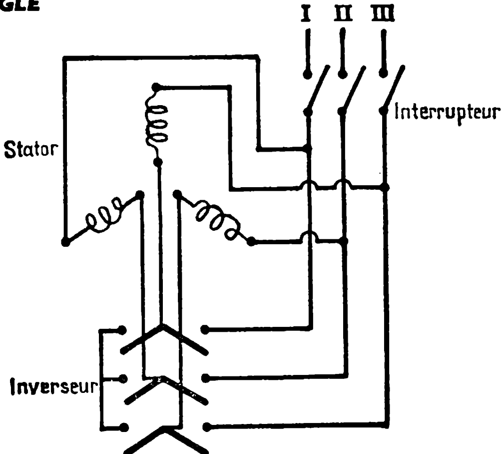


Fig. — 2. ***Démarrage étoile-triangle.*** **Schéma de montage d'un inverseur tripolaire.**

Un inverseur tripolaire suffit pour effectuer à la fois le changement des connexions des phases du stator entre elles et avec le réseau (fig. 2). Mais un interrupteur tripolaire est en outre nécessaire sur la ligne d'alimentation, pour ne pas laisser le stator sous tension à l'arrêt.

Un inverseur tétrapolaire d'une construction spéciale, dont la figure 3 est le schéma, rend inutile l'interrupteur de ligne.

Il est plus commode d'employer un commutateur rotatif, dit « *contrôleur* », dont le schéma est facile à imaginer.

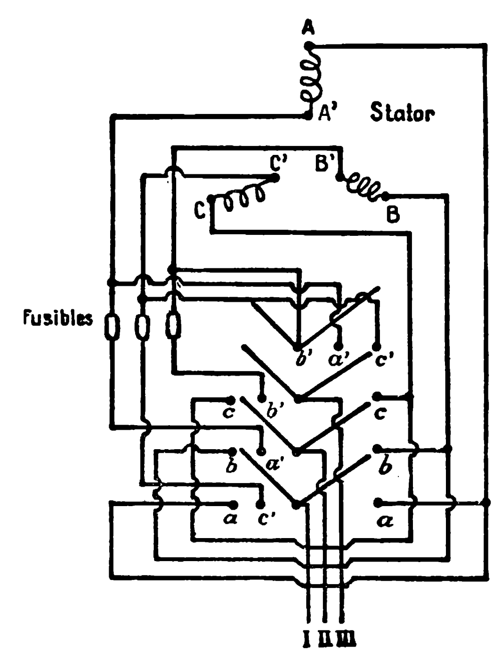


Fig. 3. — ***Démarrage étoile-triangle avec un inverseur tétrapolaire spécial.*** **Décrivez cet appareil et expliquez comment on le manœuvre.**

5. Comparons le démarrage étoile-triangle et le démarrage direct.

Le démarrage direct s'effectuerait en laissant les trois phases du stator couplées en triangle. La tension U du réseau serait appliquée entre les extrémités de chaque phase, le courant dans chaque phase serait I et le courant fourni par la ligne

$$I_{dd} = I\sqrt{3}.$$

Coupler en étoile les trois enroulements du stator et mettre la tension U du réseau entre les bornes du stator étoilé, c'est établir une tension $U : \sqrt{3}$ entre les sommets et le centre de l'étoile, c'est-à-dire entre les extrémités de chaque phase. Il en résulte dans chaque phase et dans la ligne une intensité de démarrage I_d.

Puisque les intensités sont proportionnelles aux tensions : $I_d = I : \sqrt{3}$. En comparant les valeurs de I_d et de I_{dd} :

$$I_d = I_{dd} : 3.$$

Les couples produits sont proportionnels aux carrés des tensions entre les extrémités des enroulements :

$$C_d = C_{dd} : 3.$$

Donc *le démarrage par couplage étoile-triangle, comparé au démarrage direct réduit au tiers la pointe de démarrage, mais réduit aussi au tiers le couple de démarrage.*

Par exemple, le moteur dont il a été question précédemment démarre en étoile-triangle en absorbant

$$I_d = I_{dd} : 3 = 5\,I_n : 3 = 1{,}66\,I_n = 1{,}66 \times 14 = 23\text{ A.}$$

le couple de démarrage est seulement

$$C_d = C_{dd} : 3 = 1{,}33.C_n : 3 = 0{,}44.C_n$$

6. Dans le démarrage étoile-triangle, il se produit aussi un appel de courant quand on passe au couplage en triangle.

Commandons par le moteur une machine à grande inertie, soit une meule ou un disque de polissoir, pour allonger la durée du démarrage. Plaçons un ampèremètre à aiguille calée sur l'un des fils d'alimentation du moteur; réglons l'aiguille à la valeur approximative de I_d, soit 23 ampères. Démarrons le moteur.

Nous constatons un appel de courant au second temps du démarrage quand nous changeons le couplage. L'intensité absorbée à cet instant dépasse beaucoup I_d. En faisant se succéder rapidement les deux temps du démarrage, l'ampèremètre marque plus de 50 ampères, il indique moins si les deux temps sont plus espacés. La surintensité dépend aussi de la durée de la coupure statorique que l'on produit forcément en changeant de couplage et pendant laquelle le moteur ralentit parfois.

La courbe de l'intensité pendant le démarrage tracée dans la figure 4 en fonction de la vitesse du rotor représente et explique les faits constatés.

La courbe pointillée correspond au démarrage direct avec le stator en triangle; la courbe inférieure, dont les ordonnées sont le tiers de celles de la précédente, correspond au démarrage en étoile. Le point figuratif parcourt d'abord une partie de la seconde courbe, puis saute à la première au changement de couplage.

Les variations du couple, indiquées dans la même figure, ont la même allure.

Ainsi l'intensité et le couple au cours du démarrage par couplage étoile-triangle dépendent beaucoup de l'opérateur.

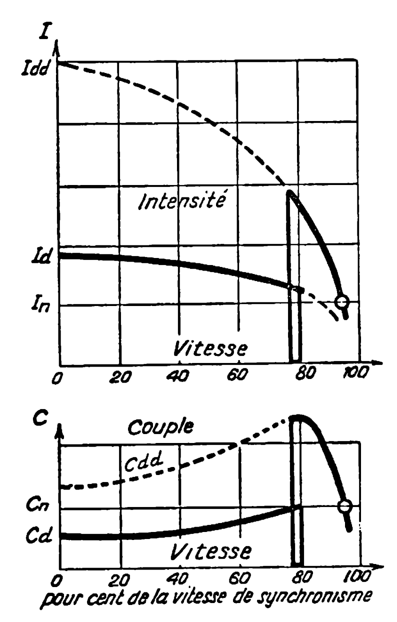


Fig.4. — *Couple et intensité d'un moteur à cage* démarrant en étoile-triangle.

7. Conclusion.

Les *inconvénients* de ce mode de démarrage sont nombreux :

une pointe d'intensité se produit au second temps de l'opération et la valeur en dépend de la manœuvre du commutateur;

le courant est coupé dans le stator quand on change le couplage;

la tension et le couple à l'instant du décollage sont imposés et il arrive que le couple réduit est insuffisant pour un démarrage en charge;

il faut six fils de connexions entre le moteur et le démarreur;

le contacteur pour démarrage automatique est compliqué.

Le seul *avantage* du démarrage étoile-triangle est d'éviter le démarrage direct proscrit par certains secteurs.

Il n'est donc pas recommandable bien qu'il soit assez employé.

DÉMARRAGE AVEC RÉSISTANCES STATORIQUES

8. Démarrage par élimination de résistances statoriques.

Ce mode de démarrage ressemble à celui des moteurs à courant continu.

Pour diminuer la pointe de courant, on insère, en série avec le stator, des résistances qui réduisent la tension aux bornes des enroulements. On les

court-circuite au cours du démarrage, soit par fractions, soit, et c'est en général suffisant, en une seule fois (fig. 5).

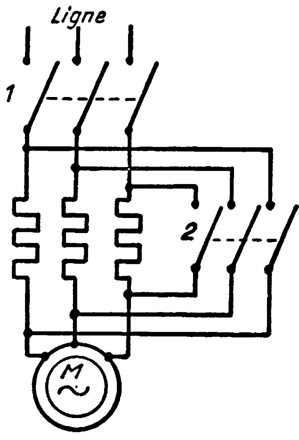


Fig. 5. — ***Démarreur par élimination de résistances statoriques*** on ferme 1, puis 2.

Remarquons que la tension entre les bornes du stator pendant que les résistances sont en circuit ne reste pas constante au cours du démarrage. La diminution, dès le décollage, du courant absorbé réduisant la chute de tension dans les résistances, la tension statorique augmente progressivement. Même avec des résistances non fractionnées, on obtient une mise en vitesse douce et sans à-coup, car, en fin de démarrage, avec le court-circuitage des résistances, la chute de tension qu'elles produisent est peu importante.

Pour le démarrage en deux temps, deux interrupteurs tripolaires suffisent : l'un sur la ligne que l'on ferme le premier, l'autre en dérivation sur les résistances.

Un commutateur rotatif à trois positions de la manette rend l'opération facile, sans possibilité de fausse manœuvre.

Comparons le démarrage avec résistances statoriques au démarrage direct.

Soient U la tension du réseau, U′ la tension aux bornes du stator lors du décollage quand les résistances sont en circuit :

1° les intensités sont proportionnelles aux tensions, donc

$$I_d = I_{dd} \cdot \frac{U'}{U};$$

2° les couples sont proportionnels aux carrés des tensions (fig. 6) :

$$C_d = C_{dd} \cdot \left(\frac{U'}{U}\right)^2.$$

Comparons le démarrage avec résistances statoriques au démarrage étoile-triangle.

Proposons-nous d'obtenir le même couple initial dans les deux cas. Il faut donc que les résistances statoriques soient calculées pour que $U' = U : \sqrt{3}$. (Un exemple de ce

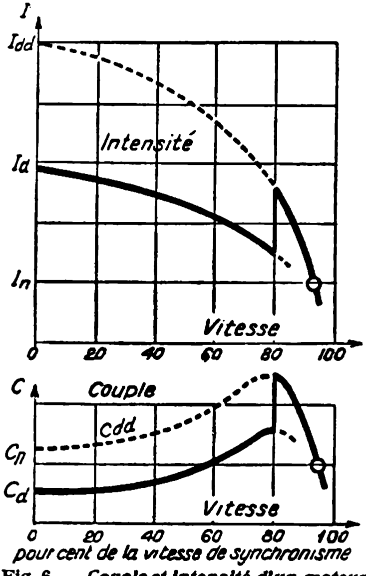


Fig. 6. — ***Couple et intensité d'un moteur à cage*** **démarrant avec résistance statorique.**

calcul est donné dans les exercices à la fin de la présente leçon.) L'intensité de décollage, proportionnelle à la tension, est alors

$$I_d = I_{dd} : \sqrt{3}.$$

Ainsi, à couple initial égal, la pointe d'intensité est supérieure à celle que l'on obtient par démarrage étoile-triangle. Ce fait s'explique facilement : l'énergie absorbée par le moteur étant la même dans les deux cas, celle qui est dissipée en chaleur Joule par les résistances exige un supplément de courant.

En somme, le démarrage par éliminations de résistances statoriques offre les *avantages* suivants :

les résistances peuvent être calculées pour obtenir le couple de démarrage qui convient à la machine entraînée;

il n'y a pas coupure du circuit statorique et le démarrage est progressif parce que la chute de tension dans les résistances diminue au cours de la mise en vitesse du rotor;

en rapprochant les résistances et l'interrupteur de démarrage, trois fils suffisent pour connecter le démarreur au moteur.

Par contre, ce procédé présente l'*inconvénient* de provoquer une pointe d'intensité supérieure à celle que produisent d'autres modes de démarrage. Pour l'utiliser avec un contacteur, il faut un appareil assez compliqué.

Il est peu employé, bien qu'il soit préférable au démarrage étoile-triangle.

DÉMARRAGE AVEC AUTO-TRANSFORMATEUR

9. Ce mode de démarrage est le meilleur pour les gros moteurs.

La tension du réseau est appliquée aux bornes 1, 2, 3, d'un auto-transformateur (fig. 7). On prend en 1′, 2′, 3′, la tension qui convient pour obtenir une surintensité modérée et un démarrage franc. En fermant l'interrupteur de ligne, on applique cette tension réduite au moteur qui démarre.

Au deuxième temps, on supprime la connexion neutre

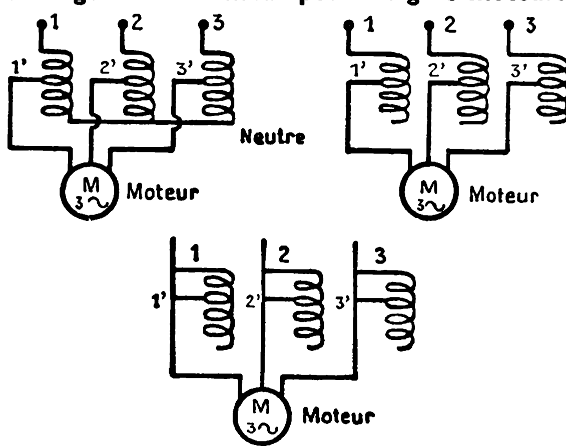


Fig. 7. — ***Démarrage d'un moteur à cage avec un auto-transformateur.*** Le démarrage se fait en trois temps correspondant aux trois schémas de la figure.

de l'auto-transformateur, de sorte que le moteur est alimenté sous pleine tension, mais avec en série dans chaque phase une impédance formée par une partie de l'enroulement du transformateur.

Au troisième temps, on court-circuite les impédances.

Déterminons les valeurs approximatives du couple de démarrage et de la pointe de courant fournie par le réseau.

Soient U la tension du réseau et U′ la tension aux bornes du stator au premier temps du démarrage. Le couple de démarrage C_d et le couple de démarrage direct C_{dd} sont proportionnels aux carrés des tensions correspondantes :

$$C_d = C_{dd} . \left(\frac{U'}{U}\right)^2 .$$

Soit I_{dd} la pointe de courant de démarrage direct; quand le moteur démarre sous la tension U′, il absorbe :

$$I = I_{dd} . \frac{U'}{U} .$$

C'est le courant fourni par l'auto-transformateur. Mais le courant pris au réseau est seulement :

$$I_d = I . \frac{U'}{U} = I_{dd} . \left(\frac{U'}{U}\right)^2 .$$

En somme, couple et courant de pointe sont réduits dans la même proportion.

Le démarrage avec un auto-transformateur est le meilleur des procédés que nous avons étudiés. Mais le coût d'un auto-transformateur est relativement élevé, aussi n'utilise-t-on ce mode de démarrage que pour des moteurs puissants, dépassant par exemple 50 *ch*.

B. MOTEURS A DOUBLE CAGE

I. Constitution d'un tel moteur.

Le stator n'a rien de particulier.

Le rotor possède deux cages d'écureuil concentriques (fig. 8), qui n'ont pas toujours le même nombre de barres. La cage extérieure est plus résistante que l'autre, (5 ou 6 fois plus). Les encoches sont percées très près de l'entrefer, elles ne sont pas fermées : l'inductance des barres qui y passent est faible. La cage intérieure est peu résistante. Les barres en sont entourées par le fer du rotor : leur inductance est grande.

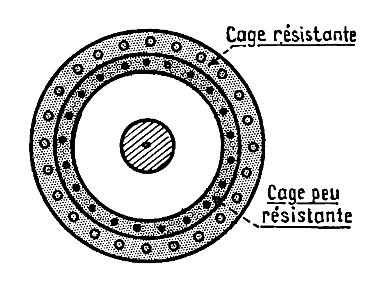


Fig. 8.
Rotor de moteur à double cage.

2. Fonctionnement.

Au *début du démarrage,* quand le rotor est encore immobile, la pulsation des courants rotoriques est égale à celle des courants d'alimentation du stator. A cause surtout de la valeur importante de ω, l'impédance de la cage intérieure, $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, est grande et les courants sont faibles dans cette cage. C'est la *cage extérieure* qui joue le rôle principal : elle produit, parce qu'elle est résistante, son couple maximum quand le glissement est grand : *c'est la cage de démarrage.*

En *marche normale,* la pulsation des courants dans le rotor, proportionnelle au glissement, est faible : l'impédance de la *cage intérieure* n'a plus qu'une faible valeur, les courants y sont intenses et c'est cette cage qui produit surtout le couple : c'est la *cage de travail.*

La figure 9 représente, en fonction de la vitesse, les couples produits séparément par les deux cages et le couple résistant qui est leur somme. Dans cette figure, le couple résultant est sensiblement constant pendant la plus grande partie du démarrage; par une construction spéciale de l'une ou l'autre cage, les constructeurs donnent à la courbe du couple de démarrage une autre forme s'ils le désirent.

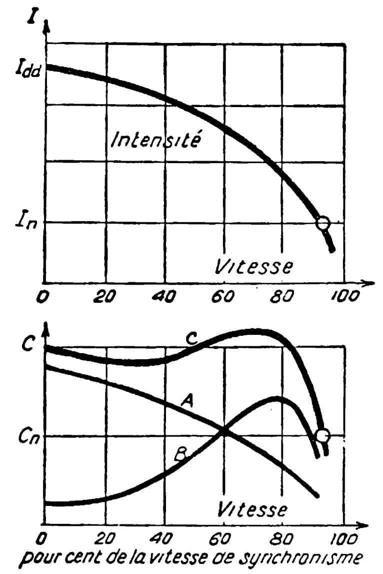


Fig. 9. — ***Intensité et couple d'un moteur à double cage, démarrage direct.***
A, couple dû à la cage extérieure,
B, couple dû à la cage intérieure
C, couple résultant

La pointe d'intensité de *démarrage direct* d'un moteur à double cage est plus faible que dans le cas d'un moteur à simple cage : $I_{dd} = 3{,}5$ à $4\ I_n$ avec $C_{dd} = 1{,}8$ à $2\ C_n$ sont des valeurs courantes pour des moteurs de petite puissance.

Le rendement et le facteur de puissance à pleine charge d'un moteur à double cage sont un peu inférieurs à ceux d'un moteur à simple cage, mais au-dessous de la demi-charge, ils sont supérieurs. Au démarrage, en particulier, le cos φ est meilleur.

Dans les applications usuelles où la marche à faible charge est fréquente, les petits moteurs à double cage assurent un cos φ moyen plus élevé : ils sont préférables.

3. Modes de démarrage.

Les procédés de démarrage que nous avons étudiés s'appliquent tous aux moteurs à double cage avec l'avantage, par rapport aux moteurs

à simple cage, de pointes de courant moindres et de couples plus énergiques.

Par exemple, en démarrant par couplage étoile-triangle, un moteur à double cage pour lequel $I_{dd} = 3,6\ I_n$ et $C_{dd} = 1,8\ C_n$ on obtient

$$I_d = 1,2\ I_n \quad \text{et} \quad C_d = 0,6\ C_n,$$

alors qu'avec un moteur à simple cage pour lequel $I_{dd} = 5\ I_n$ et $C_{dd} = 1,33\ C_n$ on a :

$$I_d = 1,7\ I_n \quad \text{et} \quad C_d = 0,44\ C_n.$$

4. Conclusion.

Les moteurs à double cage conviennent pour les démarrages en charge, ou pour la commande d'engins à grande inertie. Signalons parmi leurs applications :

l'entraînement des turbines de sucreries et d'essoreuses de blanchisseries;

la commande des appareils de levage tels que monte-charge, ascenseurs, ponts-roulants, de manutention tels que transporteurs à bandes, culbuteurs, etc.;

l'équipement des appareils agricoles;

la commande individuelle des machines-outils, des pompes, etc...

Si la plupart de ces moteurs sont de petites puissances, on en fabrique aussi de très gros qui atteignent plusieurs milliers de chevaux.

5. Moteurs dont la résistance de la cage est accrue au démarrage.

Nous savons que l'intensité d'un courant alternatif se répartit inégalement dans la section d'un gros conducteur[1], elle est plus grande à la périphérie qu'au centre et tout se passe comme si la résistance était accrue.

Cette augmentation de la résistance est plus importante si la fréquence est élevée et si la hauteur du conducteur est grande par rapport à son épaisseur. Elle peut atteindre une valeur importante si le conducteur est noyé dans du fer. Dans le cas de barres dans des encoches ouvertes, le courant circule surtout dans la région des barres située près de l'entrefer. Des formes de barres en L, en T renversé ou en trapèze ont été étudiées pour réaliser le maximum d'augmentation de résistance. On obtient, avec du courant à 50 périodes par seconde, une résistance qui atteint 4 ou 5 fois la résistance en courant continu.

Ce phénomène est utilisé par plusieurs constructeurs pour le démarrage des moteurs. Ils fabriquent des rotors dits à *encoches profondes*, où les barres sont nombreuses, hautes, parfois de forme spéciale, (fig. 10).

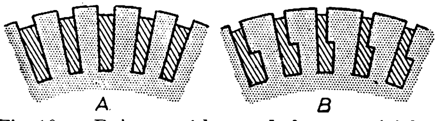


Fig. 10. — Rainures et barres de formes spéciales.
A, rainures profondes,
B, rainures à fond élargi.

Au démarrage, la fréquence du courant dans les barres du rotor est égale à la fréquence d'alimentation du stator. Elle

1. Voir *Électricité Industrielle : Lois générales* 59e *Leçon*, paragraphe 3.

diminue quand la vitesse du rotor augmente pour devenir très faible à la vitesse normale. La résistance du rotor atteint donc sa valeur maximum au décollage pour décroître progressivement pendant le démarrage.

Le couple au démarrage des moteurs à encoches profondes est un peu inférieur à celui des moteurs à double cage. La pointe de courant n'est pas beaucoup plus élevée. Rendement et facteur de puissance sont comparables.

Les moteurs à encoches profondes, plus faciles à construire, donc moins coûteux, peuvent être préférés aux moteurs à double cage.

Exercices.

1. **Le couple d'un moteur à cage varie en fonction de la vitesse du rotor, que l'on évalue commodément en pour cent de la vitesse de synchronisme. Définissez le *couple normal*, le *couple de décollage*, le *couple maximum*. Figurez-les sur la courbe des variations du couple. Dans quelles circonstances y a-t-il lieu de considérer l'un ou l'autre de ces couples?**

2. **Dessiner le schéma d'un commutateur rotatif, type contrôleur, pour démarrage étoile-triangle. Prévoir trois positions de la manette : arrêt, étoile, triangle.**

3. **Peut-on monter un moteur asynchrone triphasé à cage de 2 *ch*, 230 *V*, 50 *p/s*. 1 410 *tr/mn* sur une distribution à 200 *V*?**

Comment son fonctionnement sera-t-il modifié? (démarrage, vitesse, couple normal).

4. **Un moteur à cage de 4 *ch*, 200 *V*, 50 *p/s*, a un facteur de puissance de 0,82 et un rendement de 0,80 à pleine charge. Sa vitesse en charge est 1 425 *tr/mn*. En démarrage direct, il absorbe 4 fois l'intensité normale.**

Calculer :

1° le couple normal;

2° le glissement;

3° l'intensité absorbée à pleine charge;

4° l'intensité absorbée au démarrage;

5° la valeur approximative du couple de démarrage direct.

5. **On dispose d'un moteur à cage de 4 *ch* dont la vitesse en charge, quand il est alimenté par du courant triphasé à 50 *p/s* est 930 *tr/mn*. Démarré par branchement direct sur la ligne d'alimentation, il absorbe 3,6 fois le courant normal.**

On désire employer ce moteur en manchonnant son arbre sur l'axe de commande d'un treuil dont la démultiplication est de 1 : 30 et dont le tambour d'enroulement du câble de levage a un diamètre de 200 *mm*. Le rendement du treuil est évalué à 0,66. Ce treuil devrait pouvoir soulever une charge de 500 *kg*.

Le moteur convient-il à l'usage auquel on le destine?

Peut-on prévoir un démarreur étoile-triangle?

6. **Dessiner le schéma d'un commutateur rotatif, type contrôleur, pour démarrer en deux temps un moteur asynchrone triphasé à cage par élimination de résistances statoriques. Le courant ne doit pas être coupé au cours du démarrage.**

7. **Un moteur asynchrone triphasé à cage de 10 *ch*, 230 *V*, 4 pôles, 50 *p/s*, possède un $\cos \varphi$ de 0,85 et un rendement de 0,80 à pleine charge. Dans le cas de démarrage direct à 230 *V*, la pointe de courant est 2,2 fois l'intensité normale.**

Calculer l'intensité de pointe quand on démarre le moteur sous 115 volts.

Le facteur de puissance au décollage est 0,25.

Pour abaisser à 115 *V*, au premier temps du démarrage, la tension aux bornes du moteur, on insère des résistances égales dans chaque phase du stator.

Déterminer graphiquement la chute de tension qu'il faut obtenir dans chaque résistance.

Calculer la valeur de chaque résistance.

Solution. — Le moteur absorbe 27 *A* à pleine charge. Dans le cas de démarrage direct, la pointe d'intensité atteint 59,4 *A*. Cette pointe se réduit à environ 30 *A* quand le moteur démarre sous 115 *V*.

Au premier instant du démarrage, la tension $U = 230$ *V* fournie par la ligne est la somme géométrique de la tension $U' = 115$ *V* aux bornes du moteur et de la chute ohmique de tension RI_d produite par la pointe du courant de démarrage dans l'une des résistances en série avec le stator. La tension U' est déphasée sur l'intensité d'un angle φ tel que $\cos\varphi = 0{,}25$, la tension RI_d est en phase avec l'intensité.

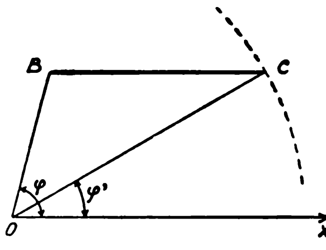


Fig. 11. — Épure du problème 7.

Soit OX l'axe des intensités (fig. 11). Traçons un vecteur $\overrightarrow{OB}$ faisant un angle de 73° 30′ avec OX (cos 75°30′ = 0,25), et dont la longueur mesure 115 *V* à une échelle déterminée.

L'extrémité du vecteur $\overrightarrow{OC}$ figurant la tension U se trouve sur un arc de cercle de rayon 2 OB décrit avec O comme centre.

Le vecteur $\overrightarrow{BC}$, parallèle à OX, représente Ri_d; il est possible de le tracer et d'obtenir ainsi le point C.

A l'échelle adoptée, BC mesure 172 *V*, donc $R = \frac{172}{30} = 5{,}7\ \Omega$.

C. MOTEURS A ROTOR BOBINÉ

I. Observons le démarrage d'un moteur à rotor bobiné.

Nous disposons d'un moteur à bagues de 7 *chevaux*, 200 *volts*, 4 pôles, absorbant 22 *ampères* à pleine charge. L'installation en est facile : le stator est relié à la ligne d'alimentation par un interrupteur tripolaire, le rhéostat de démarrage est branché aux trois frotteurs du rotor, (fig. 1 et 2).

1re Expérience. — Le rhéostat n'est pas connecté aux bagues, autrement dit les enroulements du rotor sont ouverts.

Nous constatons qu'en appliquant la tension *U* du réseau au stator, le rotor ne tourne pas. *Le moteur fonctionne comme un transformateur à vide.*

Mesurons la tension entre les bagues : nous trouvons $U_r = 75$ *volts*. Cette tension aurait une autre valeur avec un moteur d'une autre construction. Le rapport $k = \frac{U}{U_r}$ se nomme ***rapport de transformation stator-rotor.***

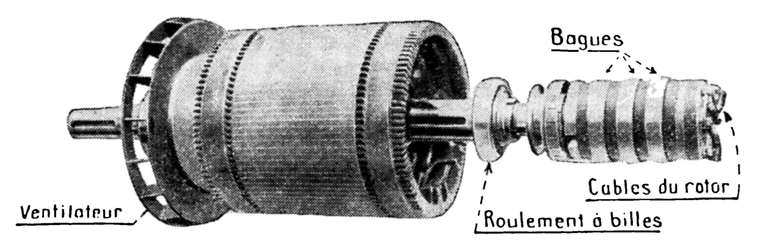


Fig. 1. — ***Rotor bobiné.*** Les trois câbles connectant les enroulements rotoriques aux bagues passent à l'intérieur de l'arbre.

Fig. 2. — ***Moteur à rotor bobiné,*** en partie coupé. Ce moteur est muni d'un dispositif de relevage des balais avec lequel on court-circuite les bagues quand le démarrage est effectué.

Quand nous aurons à utiliser ce rapport, nous modifierons un peu la valeur trouvée expérimentalement pour tenir compte du fait que les résistances ohmiques dans le stator et surtout les fuites magnétiques causent une chute de tension. Nous admettrons que cette chute de tension est d'environ 10 %. La valeur du rapport de transformation du moteur étudié est :

$$k = \frac{0{,}9 . \mathrm{U}}{\mathrm{U}_r} = \frac{0{,}9 \times 200}{75} = 2{,}4.$$

2e Expérience. — Le rhéostat de démarrage est réuni aux bagues, les résistances tout entières en circuit.

En fermant l'interrupteur du stator, le moteur démarre et atteint très vite une vitesse stable. Éliminons plot par plot les résistances du rhéostat : quand les frotteurs passent d'un plot au suivant, la vitesse du moteur s'accroît; elle arrive à la valeur 1 480 tours par minute quand le rhéostat est hors-circuit.

Pour arrêter le moteur, nous ouvrons l'interrupteur de ligne et nous ramenons le rhéostat à sa position de départ.

Plaçons un ampèremètre à aiguille calée sur l'un des fils d'alimentation du stator. Il indique une pointe d'intensité au premier temps du démarrage d'environ 28 *ampères*, soit 12,5 I_N bien plus faible que dans le cas d'un moteur à cage. Cette pointe se reproduit, avec même ordre de grandeur, au passage de la manette sur chaque plot du rhéostat.

3e Expérience. — Plaçons un ampèremètre sur l'un des fils de connexion du rhéostat aux bagues du rotor. L'appareil indique à chaque temps du démarrage près de 70 *ampères*.

Quand le démarrage est terminé, l'aiguille de l'ampèremètre, pourtant apériodique, oscille constamment sans position d'équilibre. C'est que l'appareil est traversé par un courant de très basse fréquence.

Nous pouvons mesurer cette fréquence F. L'ampèremètre n'est pas polarisé et chacune de ses oscillations indique une alternance du courant. Nous comptons 40 oscillations en 30 secondes. Donc :

$$\mathrm{F} = \frac{40}{30} : 2 = 0{,}66\ p/s.$$

Cette fréquence dépend de la vitesse N de synchronisme du moteur et de sa vitesse effective N'. Au point de vue de l'induction des courants dans le rotor, tout se passe comme si le rotor était immobile et si le champ tournant statorique tournait autour du rotor avec la vitesse N — N'. Comme le stator a 2 p pôles, il induit un courant de fréquence

$$\mathrm{F} = p\frac{\mathrm{N} - \mathrm{N}'}{60}. \qquad (1)$$

La connaissance de F permet de déterminer le glissement $g = \frac{\mathrm{N} - \mathrm{N}'}{\mathrm{N}}$.

En effet, si f est la fréquence du courant d'alimentation du stator, la vitesse de synchronisme N est telle que

$$f = p\frac{N}{60} \qquad (2)$$

En divisant membre à membre les expressions (1) et (2) :

$$\frac{F}{f} = \frac{N - N'}{N} = g.$$

Dans le cas de la fréquence standard $f = 50$, $g = F : 50 = 2\,F : 100$.

Pour mesurer F en vue d'obtenir g, il est commode d'employer un ampèremètre *polarisé* sensible que l'on branche, le démarrage effectué, entre deux frotteurs de la manette du rhéostat, chaque oscillation de l'aiguille indique une période du courant rotorique.

4e Expérience. — Chargeons le moteur en lui faisant commander une dynamo à excitation séparée, ou plus simplement en freinant sa poulie avec une planche.

Les pointes de courant aux temps successifs du démarrage conservent à peu près la même valeur. La vitesse finale est un peu plus faible qu'à vide.

2. Quelques remarques d'ordre pratique.

Les expériences que nous venons d'effectuer justifient les deux précautions suivantes à prendre quand on emploie un moteur à bagues :

1° *le rhéostat de démarrage doit être manœuvré lentement et non comme un interrupteur*, sa mise hors-circuit se fait d'ordinaire en une dizaine de secondes, on y met plus de temps si l'inertie des machines entraînées est grande;

2° *il faut ramener le rhéostat à sa position de départ dès qu'on arrête le moteur*, pour éviter un démarrage ultérieur en court-circuit. La pointe d'intensité serait alors très grande, comme si l'on produisait un court-circuit franc, avec fusion des fusibles de protection, déclenchement du disjoncteur général de l'installation, etc....

Il est commode de rendre automatique le fonctionnement du rhéostat de démarrage : on évite les fausses manœuvres et l'opération s'effectue dans les conditions prévues par le constructeur du moteur.

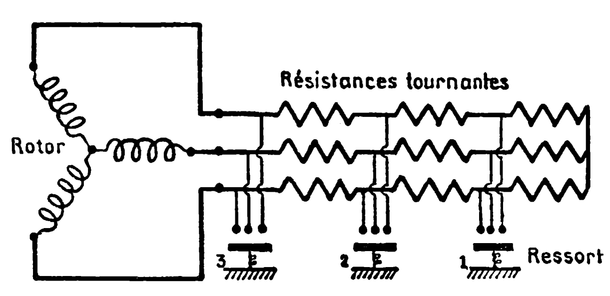


Fig. 3. — *Rotor avec démarreur à force centrifuge.* Les interrupteurs 1, 2, 3, s'enclenchent successivement.

Parmi les dispositifs imaginés, citons seulement celui qui utilise la force centrifuge. Tout le démarreur tourne avec le rotor. Chaque résistance est divisée en plusieurs parties dont les points de jonction sont connectés à des plots, les plots homologues des trois résistances sont rapprochés les uns des autres (fig. 3). Des interrupteurs se ferment successivement sous l'action de la force centrifuge à des vitesses bien déterminées et mettent en court-circuit, les unes après les autres, les diverses portions des résistances rotoriques. Le moteur n'a

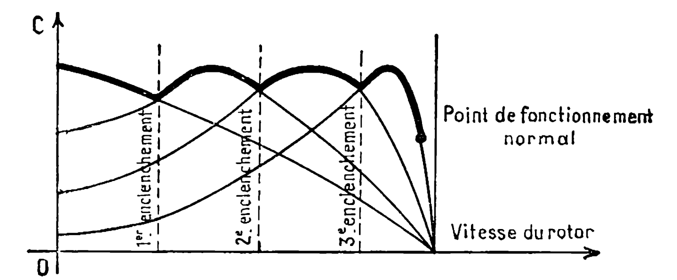


Fig. 4. — *Couple de démarrage d'un moteur à démarreur centrifuge.*

pas de bagues et démarre ou s'arrête par la seule manœuvre de l'interrupteur de ligne.

La figure 4 donne une idée des variations du couple pendant le démarrage.

3. Le couple de démarrage d'un moteur à rotor bobiné est à peu près proportionnel à l'intensité de démarrage[1].

Au décollage, *à l'instant où le rotor est encore immobile*, un moteur à rotor bobiné, démarrant sur résistances, est comparable à un transformateur dont le secondaire débite dans des résistances. Il absorbe surtout de l'énergie active et son facteur de puissance est élevé ($\cos\varphi \simeq 0{,}85$). Nous confondrons dans nos calculs approchés, puissance apparente et puissance active.

Posons que la puissance absorbée au décollage est m fois la puissance P_n en charge normale. Le réseau étant à tension constante, les courants qu'il fournit sont proportionnels aux puissances :

$$I_d = mI_n.$$

Pendant le court instant où le rotor est encore immobile, il n'y a pas production de puissance mécanique. Le courant pris au réseau aimante

1. Les moteurs shunt à courant continu possèdent la même propriété. Sur ce point, et aussi parce que leur vitesse est pratiquement constante, les deux types de moteurs sont comparables. Ils sont propres aux mêmes usages.

le stator et le rotor et induit des courants dans le rotor. Il se crée un couple entre le stator et le rotor, mais tant que le rotor reste immobile, ce couple de démarrage C_d ne fournit pas de travail mécanique. Les pertes magnétiques dans le stator et le rotor et les pertes en chaleur Joule dans le stator sont peu importantes, nous pouvons les négliger et admettre que la puissance absorbée au décollage est tout entière dissipée en chaleur Joule dans les enroulements du rotor et leurs résistances additionnelles.

Aux pertes dans le stator près, la puissance transmise au rotor est mP_n, elle est dissipée en chaleur et les courants induits produisent un couple de décollage C_d tel que :

$$mP_n = C_d(\omega_s - \omega_r) = C_d\,\omega_s, \text{ puisque } \omega_r = 0.$$

En marche normale : $P_n = C_n\,\omega_r$.
Négligeons le glissement en marche normale et posons $\omega_r = \omega_s$.

$$C_d = mC_n.$$

Donc

$$\frac{C_d}{C_n} = \frac{I_d}{I_n}$$

ce qui démontre, dans la limite des approximations faites, la propriété énoncée en tête du paragraphe.

Comparons la relation $\frac{C_d}{C_n} = \frac{I_d}{I_n}$ du démarrage d'un moteur à rotor bobiné, à l'expression

$$\frac{C_d}{C_n} = \left(\frac{I_d}{I_n}\right)^2 \times g$$

obtenue dans le cas d'un moteur à rotor en court-circuit.

Pour une même pointe d'intensité, le moteur à bagues est bien plus avantageux que le moteur à cage. Par exemple pour $I_d = 2I_n$, le premier fournit un couple $C_d = 2C_n$, alors que le second, si son glissement à charge normale est 0,05, donne seulement $C_d = 0{,}2\ C_n$.

4. Calcul approximatif d'un rhéostat de démarrage.

Soit un moteur de puissance P, fonctionnant sous la tension U, dont la tension entre les bagues du rotor est U_r, l'intensité de démarrage devant être m fois l'intensité normale I_n, proposons-nous de calculer la résistance totale R_t d'une phase du rotor au décollage.

Le rapport de transformation stator-rotor est $k = \frac{0{,}9\ U}{U_r}$.

1. Voir *25e Leçon*, paragraphe 11.

Le courant dans le rotor *au décollage* atteint l'intensité.

$$J_{rd} = kI_d = kmI_n.$$

La tension entre les extrémités d'une phase du rotor est $U_r : \sqrt{3}$. Ce qui donne, par application de la loi d'Ohm[1], pour la résistance totale d'une phase, c'est-à-dire résistance additionnelle comprise :

$$R_t = U_r : \sqrt{3} \,.\, J_{rd}.$$

La résistance de l'une des branches du rhéostat s'obtiendra en déduisant de R_t la résistance propre r de l'un des enroulements du rotor.

Exemple. — Soit un moteur triphasé à bagues de $P = 7$ *ch*, $U = 200$ *V*, $\cos\varphi = 0{,}85$, $\eta = 0{,}80$, dont la tension entre bagues du rotor est $U_r = 75$ *V*, le glissement à pleine charge $g = 0{,}045$. Calculons la résistance totale, R_t, d'une phase du rotor pour que la pointe de décollage soit $I_d = m\,I_n = 2\,I_n$.

L'intensité normale I_n s'obtient à partir de la relation :

$$P = U.I_n.\sqrt{3}.\cos\varphi.\eta;$$

nous trouvons $I_n = 22$ *A*.

Le rapport de transformation est

$$k = \frac{0{,}9 \times 200}{75} = 2{,}4.$$

Donc le courant dans le rotor atteint au décollage :

$$J_{rd} = k.m.I_n = 2{,}4 \times 2 \times 22 = 105 \text{ A}.$$

La résistance totale d'une phase est :

$$R_t = U_r : \sqrt{3} : J_{rd} = 75 : \sqrt{3} : 105 = 0{,}41 \ \Omega.$$

Si nous ne disposons pas du moteur pour mesurer la résistance propre r d'une phase du rotor, nous pouvons la calculer approximativement.

Nous savons que les pertes en chaleur Joule dans le rotor en charge normale sont $P_r = P_s \times g$ (P_s est la puissance transmise du stator au rotor et g le glissement).

Puisque $1 - g$ est le rendement électrique du rotor, sensiblement

$$P_s = P : (1 - g) \qquad \text{et} \qquad P_r = P \times \frac{g}{1-g}.$$

D'autre part, l'intensité dans le rotor est connue, c'est $J_r = kI_n$, d'où une autre expression des pertes en chaleur Joule rotoriques

$$P_r = 3rJ_r^2$$

de laquelle connaissant P_r et J_r nous pouvons tirer r.

Dans le moteur choisi comme exemple, $P = 7$ *ch*, $g = 0{,}045$, $k = 2{,}4$ et $I_n = 22$ A.

$$P_r = 736 \times 7 \times \frac{0{,}045}{0{,}955} = 243 \text{ W}.$$

L'intensité dans le rotor est $J_r = 22 \times 2{,}4 = 53$ *A*.

Donc $r = 243 : 3 \times 53^2 = 0{,}03 \ \Omega$.

La résistance par phase du rhéostat de démarrage sera donc $0{,}41 - 0{,}03 = 0{,}38 \ \Omega$ soit 13 fois la résistance propre d'une phase du rotor.

---

1. Rappelons que nous avons admis que la puissance en jeu est de la puissance active.

5. En ajoutant des résistances au rotor, on diminue la vitesse du moteur.

De l'expression des pertes en chaleur Joule dans le rotor

$$P_r = P_t \times g = 3\, R_t J_r^2$$

nous tirons le rapport

$$\frac{g}{R_t} = \frac{3 J_r^2}{P_t}.$$

Supposons que le moteur absorbe une puissance constante. La puissance P_t transmise par le stator au rotor est alors à peu près constante. L'intensité I_n dans le stator est aussi constante de même que l'intensité J_r dans le rotor qui lui est proportionnelle. Donc le rapport $\frac{g}{R_t}$ est invariable : *à puissance absorbée constante, le glissement du moteur et la résistance par phase du rotor sont proportionnels.*

En augmentant les résistances intercalées entre les bagues du rotor on accroît le glissement, la vitesse du moteur diminue.

Par exemple dans le cas d'un rhéostat 13 fois plus résistant que le rotor, le glissement, qui est $g = 0{,}045$ quand les bagues sont court-circuitées, devient $g' = 0{,}045 \times 14 = 0{,}63$ quand le rhéostat est tout entier en circuit.
La vitesse passe de 1430 à 555 tours par minute.

Un rhéostat de démarrage ordinaire ne convient pas pour régler la vitesse d'un moteur parce qu'il a été construit pour ne rester que peu de temps en circuit. Il faut un rhéostat qui puisse supporter indéfiniment le courant rotorique.

D'ailleurs, ce procédé de réglage n'est guère employé, il cause en effet des pertes en chaleur Joule trop considérables.

5. Conclusion.

Les moteurs asynchrones à rotor bobiné sont bien plus souples que les moteurs à cage. En choisissant convenablement le rhéostat de démarrage, on obtient ou l'intensité ou le couple de décollage que l'on désire avec une mise en vitesse graduellement progressive.

Toutefois, la manœuvre manuelle maladroite du rhéostat de démarrage fait souvent perdre le bénéfice de ces avantages.

Les moteurs à rotor bobiné sont construits surtout pour les moyennes et grandes puissances. On ne les emploie pour les faibles puissances que si les compagnies de distribution d'énergie électrique l'exigent ou quand il s'agit d'entraîner des engins à grande inertie.

Quand ils sont munis de démarreurs à force centrifuge, on les commande par contacteurs, aussi facilement que les moteurs à cage.

D. MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS A PLUSIEURS VITESSES

I. On obtient plusieurs vitesses par changement du couplage des bobines dans chaque phase du stator.

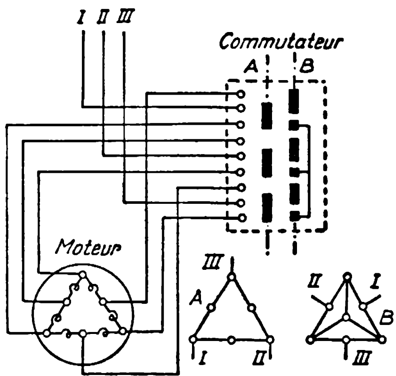


Fig. 5. — *Moteur à deux vitesses.* **Changement de couplage du stator :**
A, stator bipolaire,
B, Stator tétrapolaire.

Les schémas de la figure 5 représentent les six bobines d'un stator, soit deux par phase. En couplant ces bobines comme l'indique le schéma A, le stator possède 2 pôles; avec le couplage B, il en possède 4. La vitesse diminue de moitié.

Avec un plus grand nombre de bobines, on peut réaliser plus de combinaisons. Ce procédé est peu employé parce qu'il exige un coupleur compliqué.

2. On obtient une grande vitesse d'un moteur asynchrone en l'alimentant à fréquence élevée.

Beaucoup de machines à bois, telles que les dégauchisseuses, les raboteuses, les toupies, doivent tourner à grande vitesse. Quelques fabricants en ont construit à commande directe, sans courroies ni engrenages, l'arbre du moteur servant de porte-outil. Or la plus grande vitesse d'un moteur asynchrone triphasé, alimenté à 50 périodes par seconde, est voisine de 3 000 tours par minute et obtenue avec un moteur bipolaire. Elle est trop faible : 4 500 et même 6 000 tours par minute sont souvent nécessaires. On obtient ces vitesses soit en augmentant la fréquence du courant d'alimentation, soit en employant des moteurs à deux rotors concentriques.

I. Changement de la fréquence du courant.

Le moteur A (fig. 6), est un moteur ordinaire à cage. Il est accouplé directement au moteur B, du même nombre de pôles, et dont le rotor est bobiné. Les deux moteurs sont connectés au réseau à 50 périodes par seconde, mais ils sont branchés pour tourner en sens inverse l'un de l'autre.

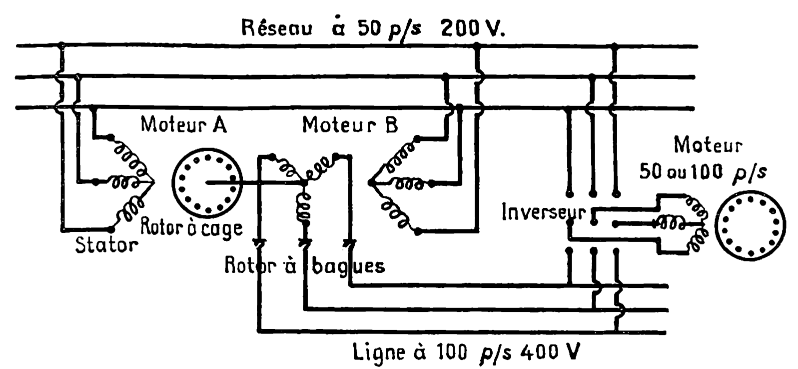


Fig. 6. — ***Convertisseur de fréquence.*** Commande d'un moteur à 50 ou 100 *p/s*.

On applique la tension du réseau aux bornes du stador de B en laissant le rotor ouvert : le rotor est immobile, en d'autres termes le glissement du moteur est 100 %, la tension rotorique induite est à la fréquence du réseau. On démarre le moteur A qui entraîne B et augmente le glissement jusqu'à près de 200 %, la fréquence de la tension aux bagues de B approche de 100 périodes par seconde.

Si le moteur d'une machine à bois est prévu pour 50 périodes par seconde, 200 volts et 3 000 tours par minute, il peut être alimenté par du courant à 100 *p/s*, sous 200 ou 400 *V* et tourner à près de 6 000 *tr/mn*; le moteur B fonctionne dans ce cas comme un alternateur.

2. Moteur à deux rotors.

Il s'agit en réalité de deux moteurs concentriques comme le montre le schéma de la figure 7.

Les deux stators S_1 et S_2 sont alimentés par le réseau. S_1 directement, S_2 par trois bagues et frotteurs. S_1 entraîne à la fois le rotor E_1 et le stator S_2 à la vitesse de N *tr/mn*. Si S_2 était immobile, il entraînerait le rotor R_2 à la vitesse de N' *tr/mn*; comme il tourne à la vitesse N, la vitesse de R_2 et de l'arbre de la machine à bois est (N + N') *tr/mn*.

Avec du courant à 50 *p/s*, quand S_1 et S_2 sont bipolaires, on obtient près de 6 000 *tr/mn*. En doublant le nombre de pôles du stator S_1 par changement du couplage des bobi-

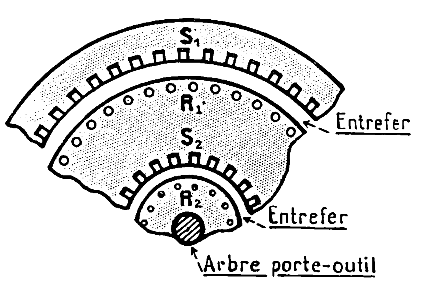


Fig. 7. — Schéma d'un ***moteur à deux rotors concentriques.***

nes, S_2 tourne alors à près de 1 500 *tr/mn* et l'arbre entraîné à près de 4 500.

On peut encore bloquer ensemble R_2 et S_2 et alimenter seulement S_1 ou bloquer R_1 et S_1 et alimenter seulement S_2, on obtient la gamme de vitesses de synchronisme 1 500, 3 000, 4 500, 6 000 *tr/mn*.

La construction d'un tel moteur est évidemment difficile et coûteuse.

E. GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE

I. Un moteur asynchrone triphasé peut fournir de l'énergie électrique au réseau sur lequel il est branché.

Soit un moteur asynchrone alimenté par une ligne triphasée. Si l'on entraîne le rotor à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, le glissement du moteur devient négatif, le rendement du rotor, $1 - g$, dépasse l unité, le rotor fournit au stator plus d'énergie électrique qu'il n'en reçoit.

La machine, de moteur, est devenue générateur : c'est une *génératrice asynchrone*.

Elle produit l'énergie sous forme de courant actif, à la fréquence du réseau, de sens contraire à celui qu'elle absorbait en fonctionnant en moteur. Mais elle continue à prendre au réseau l'énergie réactive nécessaire à son aimantation. C'est ce courant réactif qui fixe la fréquence du courant produit. Le courant résultant est déphasé en avant de la tension et non plus en arrière.

Une génératrice asynchrone ne débite donc que de l'énergie active, il faut que l'énergie réactive lui soit fournie par une source extérieure. Un réseau ne peut donc pas être alimenté seulement par des machines asynchrones, la station génératrice doit comprendre au moins une machine synchrone.

On utilise des génératrices asynchrones pour constituer des stations hydrauliques très simples, qui fonctionnent automatiquement, et fournissent une énergie d'appoint à une Centrale plus importante contenant les génératrices synchrones nécessaires à l'ensemble.

Résumé.

Il existe des moteurs asynchrones triphasés à rotor en court-circuit, à simple ou à double cage et des moteurs à rotor bobiné.

On change le sens de rotation des uns et des autres en intervertissant deux des fils de ligne aux bornes du stator.

Les vitesses de synchronisme, pour la fréquence standard de 50 *p/s*, sont

N = 3 000 *tr/mn* pour les moteurs à 2 pôles,
= 1 500 — 4 —
= 1 000 — 6 —
= 750 — 8 —, etc.

Les vitesses en charge sont inférieures de 2 à 8 % aux vitesses de synchronisme. Le rapport $g = \frac{N - N'}{N}$ **se nomme glissement (N' = vitesse de rotation du rotor).**

Les moteurs à cage, quand on les démarre en les branchant directement sur le réseau, absorbent en décollant une grande intensité et pourtant leur couple est réduit. La pointe d'intensité est moins grande et le couple plus élevé quand il s'agit de moteurs à double cage.

Pour réduire cette pointe d'intensité, on recourt au démarrage soit par couplage étoile-triangle, soit par élimination de résistances statoriques, soit par auto-transformateur.

Les moteurs à rotor bobiné démarrent par court-circuitage progressif des résistances d'un rhéostat branché entre les bagues du rotor. L'intensité de pointe et le couple de décollage sont proportionnels, leurs valeurs dépendent de la résistance du rhéostat de démarrage.

Avec des moteurs à cage, dont on commande le démarrage direct par contacteurs, on réalise des installations peu coûteuses, simples et robustes, dont l'entretien est fort réduit. Les petits moteurs à cage sont les moteurs électriques les plus employés.

Exercices.

1. Pour mesurer le glissement d'un moteur à bagues à 6 pôles installé sur un réseau à 50 *p/s*, on branche un ampèremètre polarisé sensible entre deux bagues du rotor, la manette du rhéostat de démarrage est dans la position de « marche » et shunte l'ampèremètre. L'aiguille de l'instrument oscille et l'on compte 90 oscillations en 1 minute.

Quel est le glissement du moteur et quelle est sa vitesse?

2. Est-il utile d'employer, pour la fabrication des rotors des moteurs asynchrones des tôles minces à faibles pertes magnétiques? Justifier la réponse.

3. Un moteur asynchrone triphasé de 50 *ch*, 550 *V*, 50 *p/s*, $\cos\varphi = 0{,}84$, $\eta = 0{,}83$, 720 *tr/mn*, possède 96 encoches au stator avec 8 barres par encoche. Dans chaque phase, ces barres sont couplées en série et les trois phases en étoile.

Le rotor comporte 72 encoches, avec 6 conducteurs par rainures. Dans chaque phase, les conducteurs sont réunis en série et les trois phases sont couplées en étoile.

Quelle est approximativement la tension entre les bagues du rotor quand le stator est alimenté et que le rhéostat de démarrage est déconnecté?

Quelle est approximativement l'intensité dans le rotor en marche, le moteur à pleine charge?

4. Un moteur asynchrone triphasé à bagues a fourni aux essais les résultats suivants :

résistance entre bornes du stator, à chaud : 0,36 Ω;
résistance entre bagues du rotor, à chaud : 0,10 Ω;

essai en transformateur, rotor arrêté et ouvert : tension statorique : $U_s = 550\ V$, tension rotorique : $U_r = 308\ V$; $W = 1\ 410\ W$.

essai moteur en marche à vide . .	$U_s = 550\ V$	$I_s = 15\ A$	$W = 1\ 400\ W$
essai à charge réduite.	$U_s = 550\ V$	$I_s = 36\ A$	$W = 26\ 400\ W$
essai à charge normale.	$U_s = 550\ V$	$I_s = 50\ A$	$W = 37\ 500\ W$
essai en surcharge.	$U_s = 550\ V$	$I_s = 70\ A$	$W = 52\ 500\ W$

1° Expliquer pourquoi le moteur consomme un peu plus à l'arrêt qu'en marche à vide.

2° Calculer dans chaque cas :

le facteur de puissance,

le rendement,

et tracer les courbes de $\cos\varphi$ et de η en prenant comme abscisse la puissance utile.

5. Le moteur de l'exercice 4 alimenté à 50 *p/s* tourne à 720 *tr/mn* à pleine charge.

1° Calculer la résistance par phase du rhéostat qui le démarrerait avec 1,25 fois le courant normal.

2° Il faut installer le poste de commande à 100 *m* du moteur. On projette de placer à ce poste l'interrupteur et le rhéostat de démarrage et de les relier au moteur par 6 câbles de chacun 7 fils de cuivre de 12/10. La résistance de l'un de ces câbles est 2,3 Ω par kilomètre.

Cette installation produirait une diminution de la vitesse du moteur. Calculer approximativement cette vitesse.

La section du câble de 7 fils 12/10 est 7,92 mm^2. Quelle serait la densité du courant dans la ligne du stator et dans celle du rotor? Est-elle admissible?

3° La densité usuelle pour transporter 50 *A* est 2,3 A/mm^2, pour 80 *A*, 1,75 A/mm^2. Chercher dans un formulaire quels câbles il faudrait employer et quel en serait le poids.

Quelle est la solution rationnelle à préconiser pour une telle commande à distance?

6. Dans les leçons qui précèdent, nous avons supposé que les trois phases des rotors bobinés sont couplées en étoile. Montrer qu'il est possible de les coupler en triangle. Chercher si ce mode de couplage a des avantages et des inconvénients.

Moteurs monophasés.

I. MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

1. Expériences montrant le principe des moteurs asynchrones monophasés.

Une bobine est divisée en deux parties entre lesquelles nous plaçons, sur un pivot, un petit rotor d'aluminium ou une petite cage d'écureuil (fig. 1).

Faisons passer dans la bobine un courant de quelques ampères à basse fréquence (10 à 15 *p/s*) : le rotor reste immobile.

Lançons-le dans un sens quelconque : il continue à tourner. Lançons-le dans l'autre sens : même résultat.

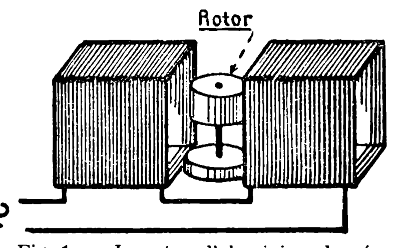


Fig. 1. — Le rotor d'aluminium lancé tourne dans un sens ou dans l'autre.

La rotation résulte de l'action du champ magnétique alternatif sur les courants induits dans le rotor.

Elle est possible dans les deux sens, *tout se passe comme si la bobine produisait deux champs magnétiques tournant en sens contraires.*

A l'arrêt, les deux champs produisent des couples égaux et de sens contraires : le rotor reste immobile.

Si on lance le rotor dans un certain sens, il y a déséquilibre entre les couples et le mouvement de rotation continue. En effet, le mouvement initial diminue le glissement du rotor par rapport au champ tournant dans le sens de la rotation et l'augmente par rapport au champ tournant en sens opposé; or, nous savons que, pour un rotor peu résistant, le maximum du couple moteur se produit pour un faible glissement; donc **le couple, dans le sens où le rotor est lancé, est beaucoup plus grand que l'autre et la rotation continue dans ce sens.**

Nous avons réalisé un moteur monophasé très simplifié et constaté deux de ses propriétés :

1° Il n'est *pas auto-démarreur* : pour qu'il tourne, il faut le lancer;

2° Il n'a pas *de sens de rotation déterminé* : il continue à tourner dans le sens où il est lancé.

2. Les petits moteurs d'induction monophasés se lancent à la main.

Le *stator* des moteurs asynchrones monophasés est muni d'un enroulement d'alternateur monophasé multipolaire.

Le *rotor* des petits moteurs est à cage d'écureuil.

Il suffit d'une impulsion en sens convenable à la poulie ou à la courroie du moteur pour obtenir le démarrage à vide.

3. Dispositifs de démarrage pour moteurs monophasés de moyenne puissance.

Le ***stator*** porte un second *enroulement de démarrage* décalé d'une fraction de pas polaire par rapport à l'*enroulement de travail.* Pendant le démarrage, le courant principal passe dans le circuit de travail; et, en même temps, un courant dérivé, *déphasé par une bobine de self ou un condensateur,* passe dans le circuit de démarrage. Les deux enroulements créent un champ tournant assez faible et de grandeur variable, mais suffisant pour le démarrage à vide (fig. 2).

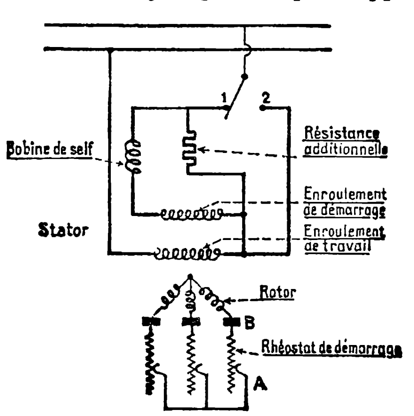


Fig. 2. — ***Démarrage d'un moteur d'induction monophasé*** au moyen d'une bobine de self : le commutateur est d'abord placé en 1, puis on amène le démarreur de A en B, on place enfin le commutateur dans la position 2.

La bobine de self peut être remplacée par un condensateur.

Le ***rotor,*** bobiné et muni de trois bagues, est identique à un rotor bobiné de moteur asynchrone triphasé.

Un ***rhéostat de démarrage*** permet :

1° au début de sa manœuvre, d'envoyer du courant dans les enroulements de travail et de démarrage du stator, et d'insérer des résistances dans les circuits du rotor;

2° de supprimer ensuite graduellement ces résistances;

3° à la fin, de supprimer le courant dans l'enroulement de démarrage du stator.

4. Conclusion.

En résumé, les moteurs d'induction monophasés ne démarrent convenablement qu'à vide. C'est un défaut grave qui fait qu'on les emploie très peu.

On a cherché à adapter au courant alternatif les moteurs à collecteur.

II. MOTEURS MONOPHASÉS A COLLECTEUR

5. Moteur série universel.

Le sens de rotation d'un *moteur série* à courant continu ne change pas quand on inverse le sens de la tension à ses bornes. On peut donc alimenter ce moteur avec du courant alternatif et obtenir une rotation régulière.

Mais pour éviter des pertes importantes par courants de Foucault et hystérésis, il faut feuilleter les inducteurs et employer des tôles minces pour la carcasse de l'induit. On obtient ainsi un moteur série qui fonctionne de façon à peu près satisfaisante, soit avec du courant alternatif, soit avec du courant continu : on le nomme *moteur universel* (fig. 3).

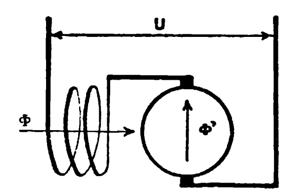


Fig. 3. — Schéma d'un *moteur série* : le flux inducteur est Φ et le flux de réaction d'induit Φ'.

Toutefois, pour une même valeur de l'*induction maximum* dans le circuit magnétique, la valeur efficace du flux est $\sqrt{2}$ fois plus petite dans le cas du courant alternatif; de sorte qu'à intensité égale, le couple moteur est réduit dans la même proportion. De plus, la grande self-induction des diverses parties du circuit diminue le facteur de puissance ainsi que l'intensité absorbée. Il en résulte, qu'à puissance égale, un moteur universel est plus volumineux qu'un moteur à courant continu. Mais le défaut le plus grave des moteur série à courant alternatif est qu'une *bonne commutation est impossible à réaliser.*

On ne construit donc de tels moteurs que pour de faibles puissances. Ils équipent surtout les appareils ménagers : aspirateurs de poussières, cireuses, machines à coudre, ventilateurs d'appartement, machines à laver, etc., et se branchent simplement avec une prise à deux broches sur les circuits d'éclairage.

Ils démarrent directement ou avec de petits rhéostats à deux ou trois plots. Ils possèdent les propriétés des moteurs série à courant continu : fort couple au démarrage, grande vitesse à vide diminuant beaucoup quand la charge croît. Remarquons que *le couple est pulsatoire,* parce qu'il est à chaque instant proportionnel au carré de l'intensité; sa fréquence est double de celle du courant d'alimentation.

6. Moteur série compensé.

Une section de l'induit d'un moteur série à courant alternatif est le siège de deux f. é. m., l'une, due à la rotation de l'induit, est nommée *f. é. m. dynamique;* l'autre, due aux variations du flux alternatif inducteur, est dite *f. é. m. statique*. Or, une section est commutée quand elle est normale au flux inducteur et c'est alors que la f. é. m. statique y atteint sa plus grande valeur, d'où de violentes étincelles aux balais. Pour atténuer ces étincelles, on augmente le nombre de lames au collecteur et on

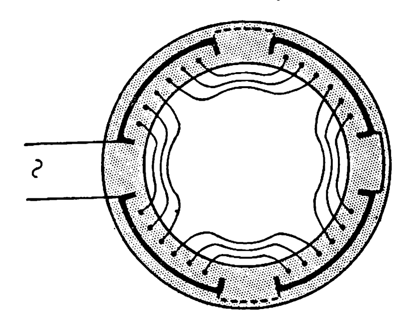


Fig. 4. — Schéma d'un stator tétrapolaire de moteur série, avec enroulement compensateur (représenté en traits fins).

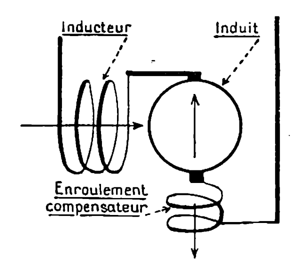


Fig. 5. — Moteur série compensé avec enroulement compensateur en circuit.

réalise les connexions des lames aux sections avec un métal très résistant.

On diminue la réaction d'induit et la self-induction de la machine en munissant les inducteurs d'un *enroulement compensateur* qui crée un flux perpendiculaire au flux principal et opposé au flux de réaction d'induit. Cet enroulement est constitué par des conducteurs placés dans des encoches des pôles qui ne sont pas saillants (fig. 4). Ils sont, soit montés en série dans le circuit (fig. 5), soit fermés sur eux-mêmes, et fonctionnent alors comme le secondaire en court-circuit d'un transformateur (fig. 6) dont le primaire est l'induit.

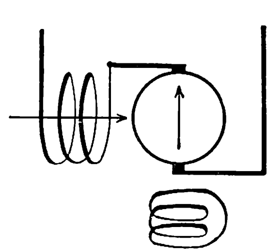


Fig. 6. — Moteur série compensé avec enroulement compensateur en court-circuit.

On atténue mieux encore les effets de la self-induction en alimentant les moteurs série compensés par des courants à basse fréquence, 15 ou 16,6 *p/s*. Ces machines ont alors un bon facteur de puissance, un excellent rendement, un fort couple de démarrage. Ils sont comparables aux moteurs série à courant continu, mais leur commutation est moins bonne, surtout au début du démarrage.

Ce sont surtout des *moteurs de traction*. On en construit dont la puissance atteint plusieurs centaines de chevaux sous 300 ou 400 volts pour équiper des locomotives électriques. L'énergie électrique est amenée sous 12 000 ou 15 000 volts par un ou par deux fils de ligne. Un transformateur porté par la locomotive abaisse la tension à la valeur d'utilisation.

Pour éviter des pertes d'énergie, on les démarre non avec un rhéostat, mais avec un auto-transformateur à plusieurs prises.

7. Moteurs à répulsion.

Ils sont constitués d'un stator ou inducteur de moteur série normal et d'un induit de moteur à courant continu dont les balais sont mis en court-circuit par un conducteur gros et court (fig. 7).

L'inducteur, comme un primaire de transformateur, induit des courants dans le rotor en court-circuit. La f. é. m. induite est déphasée de $\pi : 2$ en arrière du flux inducteur. L'enroulement induit ayant une grande self-induction, le courant qui s'y produit est déphasé de $\pi : 2$ en arrière de la f. é. m. Donc le flux dû à ce courant est en opposition avec le flux inducteur, c'est-à-dire que *deux pôles voisins de l'inducteur et de l'induit sont de même nom.*

Toutefois, si les balais sont calés sur la ligne neutre xy, il n'y a pas de courant dans l'induit car la *f. é. m. totale d'induction statique* est nulle dans chaque moitié de l'induit.

Si les balais sont calés sur l'axe des pôles, le courant dans l'induit est maximum, mais les champs inducteur et induit ont même direction et le couple résultant de leur action réciproque est nul.

Dans les positions intermédiaires, il y a répulsion entre les pôles de l'inducteur et de l'induit voisin et l'induit tourne.

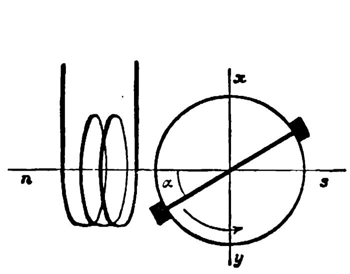


Fig. 7. — Schéma d'un moteur à répulsion; l'induit tourne dans le sens de la flèche.

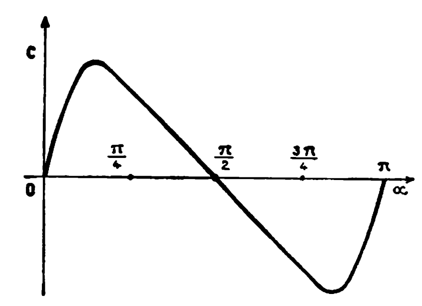


Fig. 8. — Couple de démarrage d'un moteur à répulsion en fonction de l'angle de calage des balais.

La figure 7 montre que le moteur démarre dans le sens du décalage des balais par rapport à l'axe des pôles tant que l'angle α de décalage est inférieur à $\pi : 2$.

La figure 8 représente les variations du couple au démarrage en fonc-

tion de l'angle de décalage α. On voit que le couple est maximum quand α est voisin de 30°.

On munit les moteurs à répulsion d'un enroulement compensateur comme les moteurs série.

La vitesse d'un moteur à répulsion peut être inférieure ou supérieure à la vitesse de synchronisme. C'est au synchronisme que la commutation est la meilleure.

Les moteurs à répulsion ont un bon couple de démarrage, leur défaut est une mauvaise commutation au démarrage comme les moteurs série.

Ils conviennent peu à la traction, parce qu'il faut changer le calage des balais pour renverser le sens de rotation. Il est possible de les construire pour de hautes tensions, parce que l'induit n'est pas traversé par le courant d'alimentation.

8. Beaucoup d'autres types de moteurs à collecteur ont été inventés.

La figure 9 est le schéma du moteur monophasé compensé mixte Latour, avec deux paires de balais dont l'une est en court-circuit. Il est à la fois en série et à répulsion.

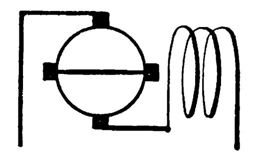


Fig. 9. — *Moteur série répulsion Latour.*

Il existe aussi des moteurs triphasés à collecteur qui, suivant leur construction, possèdent des propriétés analogues soit à celles des moteurs série à courant continu, soit à celles des moteurs shunt, mais ils sont d'un emploi peu fréquent.

Exercice.

Un moteur asynchrone monophasé absorbe, en charge normale, 9 ampères sous 110 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde.

Son $\cos\varphi$ est égal à 0,70 et son rendement est 0,55. Quelle est sa puissance?

Il est tétrapolaire. Son glissement est 0,05 en charge normale. Quelle est sa vitesse?

Calculer le moment du couple moteur.

Moteurs synchrones. Couplage des alternateurs.

I. MOTEURS TRIPHASÉS SYNCHRONES

1. Principe du fonctionnement.

Expérience. — 1° Une aiguille aimantée est placée entre les pôles d'un aimant en U. Faisons tourner l'aimant, par exemple à l'aide d'une « chignolle » (fig. 1) : l'aiguille est entraînée avec l'aimant, les pôles de l'aiguille sont en regard des pôles de noms contraires de l'aimant .

L'aimant étant déjà en rotation, plaçons l'aiguille entre ses pôles : elle vibre sur place, sans tourner.

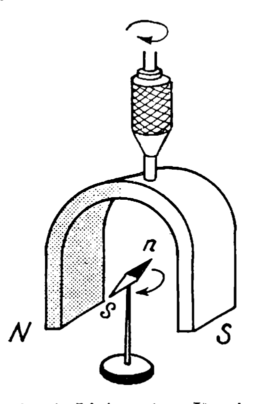


Fig. 1. L'aimant en U qui tourne entraîne l'aiguille aimantée.

L'aiguille est soumise à un couple qui résulte des actions entre les pôles de l'aiguille et ceux de l'aimant.

Si l'aiguille tourne à la vitesse de l'aimant, ce couple est constant, car la position relative des pôles est invariable : on dit qu'*elle s'accroche au champ tournant.*

Si on oppose une résistance au mouvement de l'aiguille, son axe prend un léger retard sur le champ, mais la rotation continue à la même vitesse. Quand la résistance est trop grande, l'aiguille s'arrête.

Lorsque l'aiguille est arrêtée, elle est soumise à un couple dont le sens change périodiquement, l'aiguille ne peut d'elle-même se mettre à tourner; elle vibre sur place.

2° Trois bobines identiques sont disposées pour que leurs axes fassent entre eux des angles de 120°. Nous les alimentons par des courants triphasés de quelques ampères (fig. 2).

Au point de rencontre des axes des bobines, plaçons l'aiguille aimantée : elle reste immobile. Lançons-la dans le sens convenable;

si la vitesse initiale est suffisante, elle continue à tourner. En freinant son mouvement avec une feuille de papier, elle s'arrête.

Lancée dans l'autre sens, sa rotation ne continue pas.

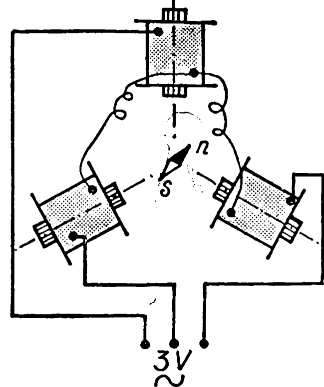


Fig. 2. — Les trois bobines à 120°, parcourues par des courants triphasés, font tourner l'aiguille aimantée après qu'on l'a lancée dans le sens convenable.

Ces faits s'expliquent par ce que nous savons des champs magnétiques tournants : *les trois bobines parcourues par des courants triphasés produisent un champ tournant* ayant les mêmes effets que celui créé par l'aimant.

L'appareil ci-dessus comporte les élémens essentiels d'un *alternateur bipolaire* : *stator enroulement triphasé, rotor électro-aimant* assimilable à l'aiguille aimantée.

Un alternateur triphasé est donc réversible : alimenté par des courants triphasés, il fonctionne en moteur. Mais un couple moteur ne peut se produire que si le rotor tourne à la même vitesse que les champs tournants créés par le stator. C'est pourquoi ces moteurs se nomment *moteurs synchrones.*

Un moteur synchrone industriel est identique à un alternateur.

2. Démarrage des moteurs synchrones.

Brancher un moteur synchrone triphasé sur le réseau est une opération assez délicate. Il faut, en effet, réaliser les conditions préalables suivantes :

1° amener l'inducteur à tourner au *synchronisme;*

2° régler la *f. c. é. m.* du moteur à peu près à la valeur de la *tension du réseau;*

3° s'assurer que la tension du réseau et celle de la machine sont en *concordance de phase;*

4° vérifier que les phases de la ligne et du moteur sont disposées dans le *même ordre.*

a) ***Mise au synchronisme.***

Si l'on dispose de courant continu, on entraîne l'alternateur par l'excitatrice fonctionnant comme moteur.

On utilise parfois un moteur asynchrone spécial pour la mise en vitesse du moteur synchrone.

On peut aussi, avec un auto-transformateur pour limiter l'intensité prise

au réseau, démarrer le moteur en asynchrone. Les circuits amortisseurs ou les pièces polaires pleines de l'inducteur jouent le rôle de cage d'écureuil.

b) ***Indicateur de synchronisme.***

Le plus simple consiste en une lampe pouvant supporter une tension double de celle du réseau et montée, comme l'indique la figure 3, en pont par-dessus l'interrupteur de couplage ouvert.

Quand le moteur est excité, la lampe est soumise à une tension qui est la différence géométrique des tensions de la ligne et du moteur qui fonctionne alors comme un véritable alternateur à vide.

Si les fréquences sont différentes, cette différence varie avec le temps; l'éclat de la lampe varie; des périodes d'allumage et d'extinction se succèdent et deviennent plus longues quand on approche de la vitesse de synchronisme. *Au synchronisme*, quand *les phases concordent, la lampe est éteinte.* On effectue alors le couplage : on couple à *l'extinction.*

Fig. 3. — Montage d'une lampe pour vérifier le synchronisme.

c) ***Indicateur d'ordre des phases.***

Lors de la première installation du moteur ou quand des modifications ont été faites à l'installation, il est nécessaire de s'assurer que les phases de la ligne et celles

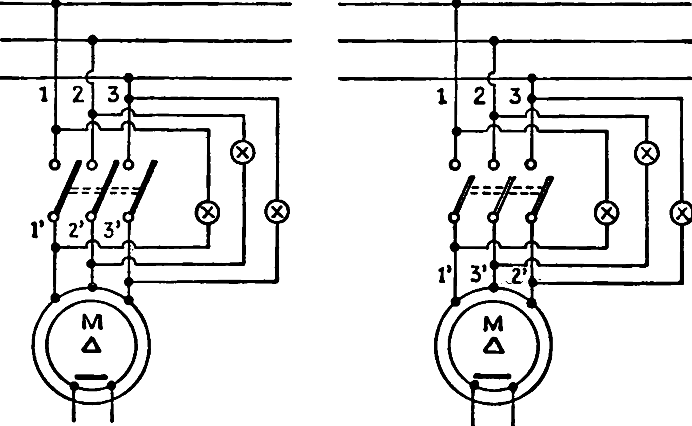


Fig. 4. — ***Montage de lampes pour vérifier l'ordre des phases.*** Si les phases se correspondent, comme sur la figure de gauche, les trois lampes sont éteintes au synchronisme. Si les phases ne se correspondent pas, comme sur la figure de droite, une lampe est éteinte et deux sont allumées au synchronisme : les trois lampes ne sont jamais éteintes simultanément. Trouvez pourquoi en étudiant la figure 5.

du moteur se correspondent dans le même ordre à l'interrupteur de couplage.

On monte alors trois lampes de phase comme l'indique la figure 4.

1° Si les connexions sont bonnes les trois lampes s'allument et s'éteignent *ensemble*, quand le synchronisme est proche;

2° Si la jonction des phases est mauvaise, les lampes s'allument et s'éteignent *les unes après les autres*.

On s'explique le phénomène en examinant, sur la figure 5 qui représente les tensions à un instant donné, comment varie la *différence géométrique* des tensions 1-1′, 2-2′, 3-3′ quand le déphasage φ entre les tensions 1-1′ augmente.

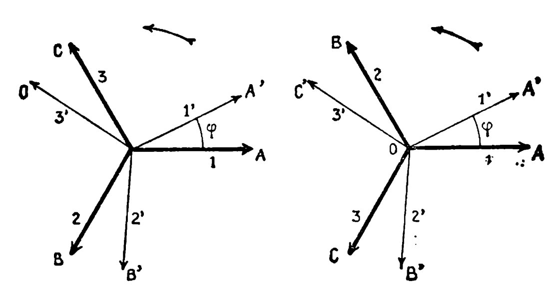


Fig. 5. — Les deux systèmes de vecteurs tournent dans le sens de la flèche, le système 1′, 2′, 3′ *un peu plus vite* que le système 1, 2, 3. Constater comment varient les différences géométriques 1 — 1′ = $\overrightarrow{A'A}$, 2 — 2′ = $\overrightarrow{B'B}$, 3 — 3′ = $\overrightarrow{C'C}$ dans les deux cas de figures.

Si la jonction des phases est mauvaise, il faut arrêter le moteur et croiser les connexions de deux de ses phases à l'interrupteur de couplage.

3. En faisant varier l'excitation d'un moteur synchrone, on modifie le déphasage de la tension en ligne sur l'intensité.

a) Chargeons un moteur synchrone en lui faisant entraîner une dynamo qui débite une puissance constante.

Modifions l'excitation du moteur synchrone et mesurons pour chaque valeur *i* du courant d'excitation, l'intensité I absorbée par le moteur.

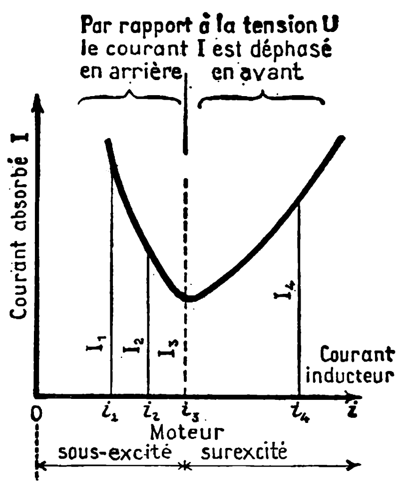


Fig. 6. — *Courbe en V d'un moteur synchrone.*
Pour fournir la même puissance mécanique, l'intensité I du courant absorbé varie avec le courant inducteur ou courant d'excitation *i*.

Traçons la courbe de I en fonction de *i* : nous obtenons (fig. 6) une courbe dite *courbe en V* ou *courbe de Mordey*. Il existe une courbe ana-

logue pour chaque valeur de la puissance fournie par le moteur (fig. 7).

Ces courbes montrent que, pour une charge constante, l'intensité

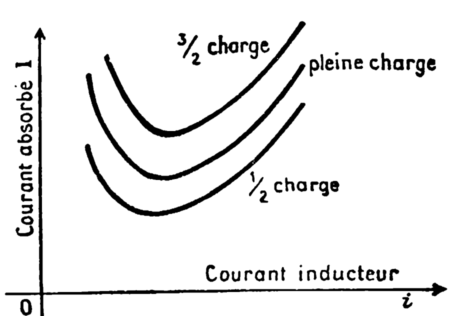


Fig. 7. — *Courbes en V d'un moteur synchrone à diverses charges.*

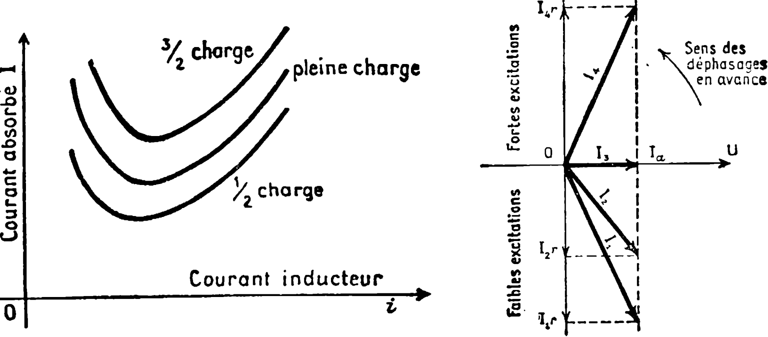


Fig. 8. — I_1, I_2, I_3, I_4 sont les intensités des courants absorbés par le moteur pour des excitations de plus en plus fortes.

L'intensité active I_a reste constante et égale à I_3 quelle que soit l'excitation.

Plus l'*excitation est faible*, plus l'intensité réactive I_1 déphasée *en arrière* de la tension est grande.

Plus *l'excitation est forte*, plus l'intensité réactive déphasée en avant est grande.

absorbée à tension constante par un moteur synchrone passe par un minimum pour une valeur déterminée de l'excitation.

b) Puisque la puissance active du moteur reste constante ainsi que la tension, l'intensité active du courant absorbé ne varie pas : c'est l'intensité réactive qui change (fig. 8).

A faible excitation, l'intensité du courant absorbé est grande (fig. 6), donc sa composante réactive est grande; *l'intensité est fortement déphasée en arrière sur la tension* (fig. 8).

Quand l'excitation croît, ce déphasage diminue d'abord ainsi que l'intensité absorbée. Au *minimum d'intensité absorbée, le déphasage est nul, et le facteur de puissance du moteur est égal à l'unité.*

Si l'on augmente davantage l'excitation, l'intensité absorbée croît. Il y a nouveau déphasage de l'intensité sur la tension, mais en sens contraire.

A faible excitation, le moteur synchrone prend de l'énergie réactive au réseau pour renforcer l'excitation insuffisante. Inversement, dans le cas de forte excitation, la machine fournit de l'énergie réactive au réseau.

Un moteur synchrone surexcité relève donc le facteur de puissance de l'installation.

4. Moteurs asynchrones synchronisés.

Nous savons (64e leçon, 1re T. I.) qu'améliorer le cos φ d'une installation est une opération souvent intéressante parce qu'elle procure une économie.

Y employer un moteur synchrone est incommode à cause de la complication du démarrage de ces machines.

On construit des moteurs asynchrones, dits *asynchrones synchronisés.* qui possèdent la facilité de démarrage des moteurs asynchrones et la propriété des moteurs synchrones de déphaser l'intensité du courant en avant de la tension.

Ces moteurs portent une excitatrice basse tension en bout d'arbre; leur stator est normal; leur rotor triphasé est calculé spécialement. On les démarre comme des moteurs asynchrones à bagues. Quand ils ont atteint leur vitesse maximum, on fait passer un *courant continu* d'assez grande intensité dans deux phases en série du rotor et on met la troisième phase en court-circuit. L'accrochage au synchronisme se produit.

De tels moteurs ont un cos φ égal à l'unité à charge normale; à demi-charge, le cos φ est environ 0,85 avec déphasage de l'intensité en avant de la tension. L'amélioration qu'ils produisent du facteur de puissance de l'installation dont ils font partie peut donc être importante.

5. Usages des moteurs synchrones.

Les propriétés de ces moteurs les rendent fort utiles dans quelques cas particuliers, mais peu pratiques en général. On s'en sert :

1° quand on désire une vitesse bien constante, par exemple pour mouvoir des horloges ou des appareils d'étude, pour entraîner des métiers à tisser;

2° quand on cherche à relever le cos φ d'un groupe de récepteurs.

II. COUPLAGE DES ALTERNATEURS

6. Le couplage en série des alternateurs est sans intérêt et d'ailleurs en général instable.

On élève très facilement la tension fournie par un alternateur à l'aide d'un transformateur. Ce procédé est bien plus simple que la mise en série de deux machines qui devraient, non seulement produire la même fréquence, mais conserver rigoureusement la même vitesse; cette dernière condition est en effet indispensable pour que leurs f. é. m. restent constamment en concordance de phase et puissent toujours s'ajouter.

Or, dans le cas d'alternateurs commandés par des moteurs différents, des écarts de vitesse sont inévitables.

Soient deux alternateurs ayant la même fréquence et la même f. é. m. *couplés en série.* Leurs f. é. m. E_1 et E_2 en phase s'ajoutent. Supposons que, pour une cause quelconque, une petite différence de phase φ se pro-

duise entre leurs **f. é. m. (fig. 9). La f.** é. m. de l'ensemble est la somme géométrique $\overrightarrow{OE}$ de E_1 de et E_2. L'intensité débitée est très généralement en retard sur la f. é. m. Le déphasage est alors plus grand pour l'alternateur en avance que pour l'alternateur en retard. Il en résulte que la puissance fournie par le premier est plus faible que celle fournie par le second : l'écart des vitesses tend donc à augmenter jusqu'à ce que les deux f. é. m. soient en opposition.

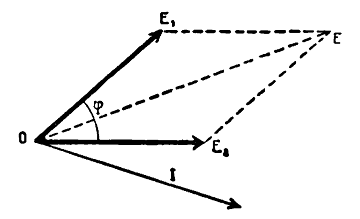


Fig. 9. — Diagramme des f. é. m. de deux alternateurs couplés en série. I est l'intensité du courant qui les traverse, E_1 la f. é. m. de l'un, E_2 la f. é. m. de l'autre.

Un tel couplage n'est pas stable. Il ne pourrait l'être que dans le cas exceptionnel d'un déphasage de l'intensité en avant de la tension.

7. Quand des alternateurs sont couplés en parallèle, le régime est stable.

Les f. é. m. E_1 et E_2 ont même valeur, même fréquence et sont *en opposition dans le circuit intérieur ABC de deux machines.* Elles se font équilibre et quand le circuit extérieur est ouvert (fig. 10), aucun courant ne circule dans le circuit ABC.

Supposons que l'un des alternateurs prenne de l'avance. Sa f. é. m.

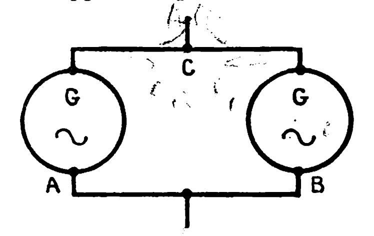


Fig. 10. — *Montage de deux alternateurs en parallèle.*

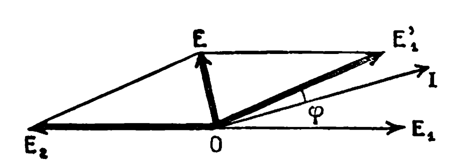


Fig. 11. — Diagramme des f. é. m. de deux alternateurs couplés en parallèle.

passe de E_1 en E'_1 (fig. 11). La résultante de E'_1 et de E_2 n'est plus nulle, elle est représentée par OE. Un courant I circule dans les deux alternateurs, quand le circuit extérieur est ouvert. L'intensité est en retard sur la tension E. La figure montre que la puissance fournie au circuit intérieur ABC est positive pour l'alternateur en avance, négative pour l'autre; le premier fonctionne comme générateur, l'autre comme récepteur. L'égalité des vitesses tend à se rétablir par l'action de cette *puissance synchronisante. Le couplage est stable.*

Quand les alternateurs débitent tous deux dans le circuit extérieur, un phénomène analogue se produit.

8. Opérations à effectuer pour coupler un alternateur sur le circuit extérieur.

Ce sont d'abord les opérations que nous avons indiquées pour mettre en marche un moteur synchrone :

1° démarrer l'alternateur et l'amener au synchronisme en agissant sur le moteur mécanique de commande;

2° avec le rhéostat d'excitation, rendre la tension de l'alternateur égale à la tension en ligne;

3° vérifier, s'il y a lieu, la concordance des phases et introduire la machine en circuit.

Il faut ensuite faire débiter à l'alternateur sa charge normale en augmentant peu à peu la puissance mécanique du moteur de commande et en réglant l'excitation, pour obtenir l'intensité et le déphasage voulus du courant débité.

Pour *découpler un alternateur*, on réduit peu à peu la puissance du moteur qui l'entraîne en maintenant toujours l'intensité débitée à sa valeur minimum. Quand cette intensité est devenue assez faible, on met la machine hors circuit.

Ces opérations de couplage et de découplage, qui s'exécutent sur des machines en général très puissantes, ne doivent causer aucune perturbation dans le réseau; on ne les confie qu'à des électriciens et des mécaniciens expérimentés.

Exercices

1. La vitesse d'un tourne-disques de phonographe est comprise entre 78 et 79 tours par minute. Le plateau porte-disques est monté directement en bout de l'arbre vertical d'un petit moteur synchrone alimenté par du courant monophasé à 50 *p/s*. Quel est le nombre de pôles du moteur? Quelle est la vitesse exacte du disque?

(Les tout petits moteurs synchrones de quelques watts ont un inducteur qui est constitué par une roue dentée en fer sans bobinage. Ils sont dits à fer tournant ou encore à self-inductance périodiquement variable.)

2. Une usine consomme en moyenne 200 *kVA* avec un cos φ égal à 0,71. On ajoute à l'installation un moteur asynchrone synchronisé de 60 *kW* qui, à demi-charge, possède un cos φ égal à 0,85 avec *déphasage en avant* de l'intensité sur la tension. Que devient le facteur de puissance de l'installation?

3. Rappelez les opérations à effectuer pour coupler une dynamo génératrice shunt :

a) — sur une batterie d'accumulateurs;

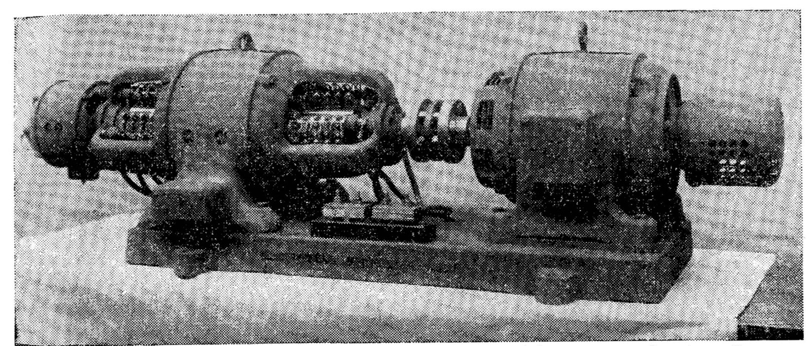
b) — sur un réseau à courant continu.

Comparez le couplage d'une génératrice shunt sur réseau continu au couplage :

a) — d'un alternateur monophasé sur un réseau monophasé;

b) — d'un alternateur triphasé sur un réseau triphasé.

4. Peut-on, dans le cas d'un alternateur monophasé, monter la lampe indicatrice du synchronisme pour que le couplage doive se faire à l'allumage?



Cliché Constructions électriques, Nancy.

Groupe convertisseur pour nickelage. Il se compose :
à *droite*, d'un **moteur asynchone triphasé,** 20 *ch*, 960 *tr/mn*, à rotor bobiné;
à *gauche*, d'une **dynamo à basse tension,** 12 *V*, 800 *A*. A cause de la grande intensité du courant débité, on a construit la dynamo avec deux collecteurs de grande largeur. Pour faciliter le réglage de la tension, la génératrice est à excitation séparée; l'excitatrice est en bout d'arbre à gauche, elle fournit 100 *V*.

29e LEÇON

Transformation de courants alternatifs en courant continu par convertisseurs tournants.

Le courant continu est indispensable pour l'électrochimie, la charge des accumulateurs. On l'utilise souvent dans les installations de traction électrique ou les équipements de levage.

La transformation des courants alternatifs en courant continu est donc une opération industrielle fréquente. Elle s'effectue par des convertisseurs tournants ou par des redresseurs statiques.

I. GROUPES MOTEURS-GÉNÉRATEURS

1. Un moteur à courant alternatif commande une génératrice à courant continu.

Les deux machines sont en général montées sur le même socle; leurs arbres, dans le prolongement l'un de l'autre, sont accouplés par un manchon semi-élastique (fig. 1).

Le moteur est le plus souvent un moteur asynchrone, la dynamo est

shunt ou compound. L'avantage de ce dispositif est l'indépendance du moteur et de la génératrice. Le moteur peut être à tension élevée : 5 000 ou 10 000 volts.

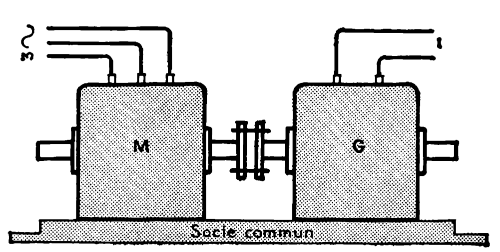


Fig. 1. — ***Groupe moteur-générateur.*** Il reçoit de l'énergie électrique sous forme de courants triphasés et rend de l'énergie électrique sous forme de courant continu.

On reproche aux groupes moteurs-générateurs d'être coûteux, puisqu'ils comportent deux machines, et surtout d'avoir un faible rendement parce que ce rendement est le produit des rendements du moteur et de la génératrice.

2. Système Léonard.

A titre d'exemple d'emploi d'un groupe moteur-générateur, indiquons le principe de la commande des tambours d'enroulement qui font monter et descendre les cages ou bennes dans les puits de mines au moyen d'un moteur à courant continu alimenté par un dispositif spécial dit montage ou couplage Léonard.

La *figure* 2 donne le schéma de l'ensemble de l'installation dont la puissance atteint 1 000 *kW*.

Les *tambours d'enroulement* 1, sont entraînés par un *moteur d'extraction* 2, *à courant continu*. Les deux machines sont calées sur le même arbre et tournent à une vitesse de 20 à 60 tours par minute (les diamètres des tambours sont 3,8 *m* et 5 *m*).

Le moteur d'extraction est alimenté par un groupe Léonard comprenant :

un *moteur d'entraînement*, 3, asynchrone, branché sur le réseau triphasé;

une génératrice de courant continu, 4, dite *dynamo de démarrage*, dont l'excitation séparée est réglable à volonté, en *grandeur* et en *sens*.

une *excitatrice*, 5, fournissant le courant nécessaire à l'excitation du moteur d'extraction et de la génératrice.

Les arbres des machines 3, 4 et 5, sont manchonnés entre eux et l'ensemble constitue un groupe moteur-générateur à deux génératrices.

Le fonctionnement du système est le suivant.

L'excitation du moteur d'extraction 2 est maintenue constante. La vitesse et le sens de rotation de ce moteur ne sont donc déterminés que par la grandeur et le sens de la tension aux bornes de l'induit.

L'excitation de la génératrice 4 est réglée en *grandeur* et *sens* au moyen d'un rhéostat potentiométrique 6 actionné par un levier de manœuvre 7.

En faisant varier l'excitation de la dynamo de démarrage 4 dans un

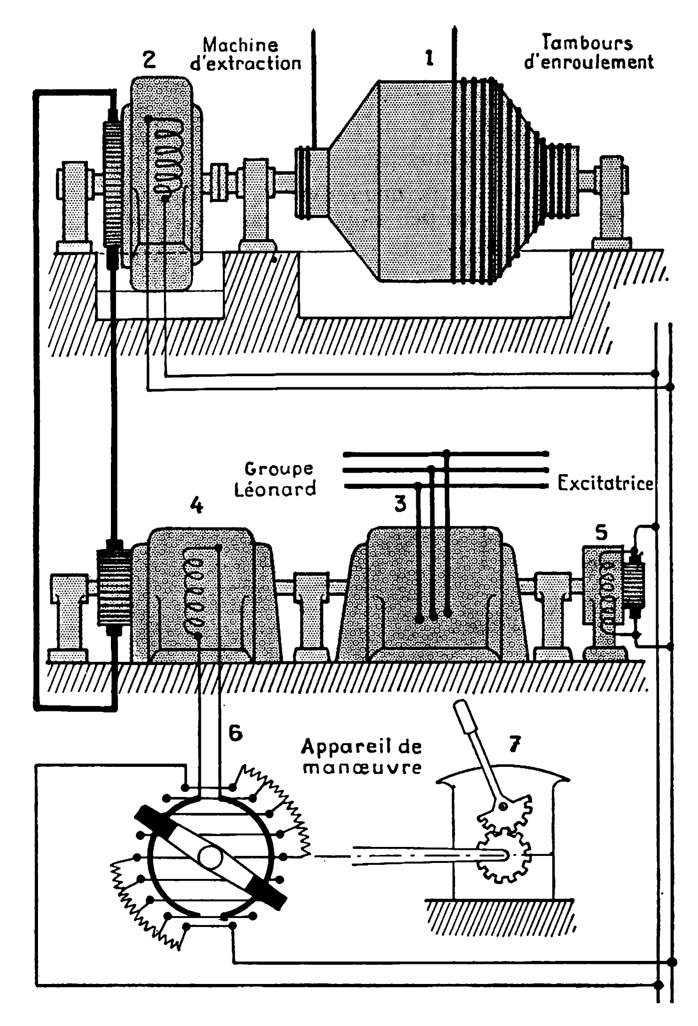


Fig. 2. — Schéma de la ***commande d'une machine d'extraction par un moteur à courant continu en couplage Léonard.***

Le groupe de machines 3, 4, 5 tourne toujours dans le même sens, à vitesse sensiblement constante.

Le groupe de machines 1 et 2 tourne à volonté dans les deux sens, avec une vitesse variant de 0 à un même maximum *dans les deux sens*; et cela, par la *seule manœuvre du levier de l'appareil* 7.

sens ou dans l'autre, on règle donc la vitesse du moteur d'extraction de zéro à sa valeur maximum *dans les deux sens de rotation.*

Parce que l'intensité du courant d'excitation est réduite, on peut subdiviser la résistance du rhéostat 6 pour obtenir un réglage très précis de la vitesse des tambours d'enroulement. De plus, le démarrage s'effectue sans pertes d'énergie appréciables.

On remarquera combien la manœuvre de l'ensemble est simple et sûre puisqu'on l'effectue en poussant ou tirant le levier unique de l'appareil 7.

II. COMMUTATRICES

3. Examinons une commutatrice triphasée.

C'est une dynamo polymorphique (déjà décrite § 12, page 189).

D'un côté de l'induit (fig. 3) est monté un collecteur et entre les balais

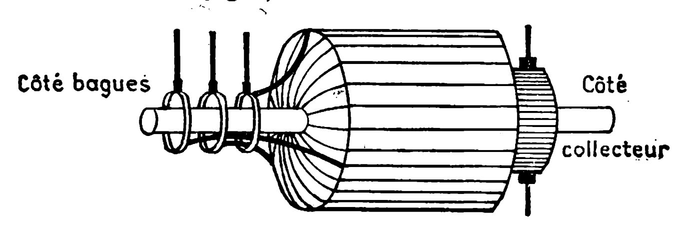


Fig. 3. — *Induit d'une commutatrice bipolaire.*
Les commutatrices industrielles sont toutes multipolaires.

est branché l'enroulement shunt des inducteurs : la machine est une génératrice shunt ou un moteur shunt.

De l'autre côté de l'induit, trois bagues isolées de l'arbre sont connectées à trois points équidistants de l'enroulement de l'induit quand la dynamo est bipolaire, à six points si elle est tétrapolaire : la machine est un alternateur triphasé ou un moteur synchrone à induit tournant.

Beaucoup de commutatrices puissantes sont hexaphasées. L'arbre porte six bagues. Nous savons que l'on obtient facilement des tensions hexaphasées à partir de tensions triphasées.

Ou bien chacun des trois enroulements secondaires d'un transformateur est divisé en deux moitiés que l'on connecte aux bagues pour réaliser le couplage à *double triangle* de la figure 4 (en bas).

Ou bien les extrémités des enroulements secondaires triphasés sont réunies à des points diamétralement opposés de l'induit : c'est *le montage diamétral* (fig. 4, en haut).

4. Fonctionnement à vide d'une commutatrice : transformation de tensions alternatives en tension continue.

Démarrons la commutatrice en la faisant fonctionner comme moteur shunt du côté continu; puis, avec les précautions indiquées pour l'accrochage d'un moteur synchrone, branchons-la sur le réseau alternatif; enfin, supprimons le courant continu. La commutatrice continue à tourner : c'est un *moteur synchrone* du côté alternatif, une *génératrice shunt* à vide du côté continu.

1° Nous constatons que, si la tension triphasée est de 200 volts entre bagues, nous obtenons une tension continue de 325 volts.

2° Nous remarquons qu'en manœuvrant le rhéostat d'excitation du côté continu la vitesse ne change pas (le moteur est synchrone), et que la tension continue ne varie pas.

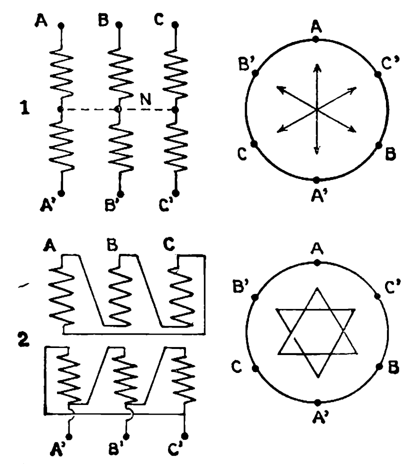


Fig. 4. — ***Commutatrice hexaphasée*** avec en 1, connexions diamétrales, en 2, connexions en double triangle.

Donc, à vide, le rapport de la tension alternative entre bagues à la tension continue entre balais ne dépend que de la construction de la commutatrice. On démontre que, dans le cas où la tension alternative et la distribution du flux dans l'entrefer sont sinusoïdales, ce rapport, que l'on nomme *rapport de transformation à vide*, a pour valeurs :

commutatrice monophasée : $\frac{\text{U alternative}}{\text{U continue}} = 1 : \sqrt{2} = 0{,}71$

— triphasée : $\sqrt{3} : 2\sqrt{2} = 0{,}61$

— hexaphasée à double triangle : $\sqrt{3} : 2\sqrt{2} = 0{,}61$

— hexaphasée montage diamétral : $1 : \sqrt{2} = 0{,}71$.

Pratiquement, les rapports sont un peu inférieurs aux rapports théoriques.

Donc, ***pour qu'une commutatrice fournisse une tension continue déterminée, il faut l'alimenter à la tension alternative correspondante : un transformateur est presque toujours nécessaire pour modifier convenablement la tension du réseau.***

1. Si l'on possède un alternateur, le procédé le plus simple est de brancher la commutatrice sur l'alternateur à l'arrêt. En mettant l'alternateur en marche, la commutatrice démarre en même temps.

5. Fonctionnement en charge : transformation de courants alternatifs en courant continu.

On constate qu'à *puissance égale débitée*, la commutation est meilleure, la chute de tension dans l'induit plus faible, le dégagement de chaleur dans l'induit moindre pour une commutatrice que pour une génératrice à courant continu.

On explique sommairement ces particularités en remarquant qu'une commutatrice est à la fois moteur et générateur. Or, pour un sens déterminé de rotation, les flux produits par le courant de l'induit sont de sens contraires pour un moteur et pour une génératrice. Quand la machine joue à la fois les deux rôles, la distorsion du flux dans l'induit est supprimée et la réaction d'induit est très atténuée.

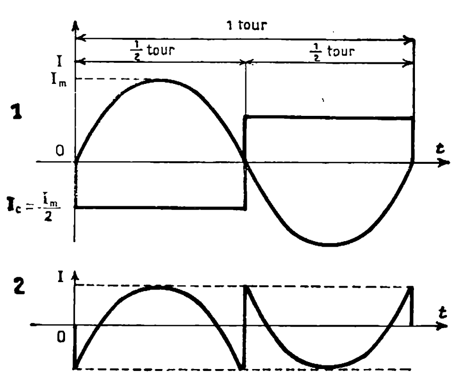


Fig. 5. — **Intensité dans un conducteur du *milieu* d'une phase d'une commutatrice *monophasée*. En 1, le courant alternatif et le courant continu sont représentés séparément, la courbe 2 représente leur somme.**

D'autre part, le courant, dans un conducteur choisi dans le milieu d'une phase, est la somme algébrique du courant alternatif absorbé et du courant continu débité. La figure 5 représente les deux courants et leur somme dans le cas d'une commutatrice monophasée et pour $\cos\varphi = 1$. La valeur efficace du courant résultant est plus faible que celle de l'un ou de l'autre des composants. Or, la puissance que peut fournir normalement une machine est limitée par son échauffement. On établit qu'une dynamo polymorphique qui donne 100 *kW* en génératrice continue peut fournir 133 *kW* en commutatrice triphasée et 193 *kW* en commutatrice hexaphasée. C'est pourquoi les commutatrices sont plus petites que les groupes moteurs-générateurs et pourquoi les commutatrices hexaphasées sont souvent préférées aux commutatrices triphasées.

Le rendement d'une commutatrice de 100 *kW* atteint 0,95.

6. Réglage de la tension continue d'une commutatrice.

A cause de la chute ohmique dans l'induit, la tension continue aux bornes d'une commutatrice baisse un peu quand l'intensité débitée augmente.

Pour obtenir que cette tension soit constante, ou même augmente un peu avec la charge pour compenser la chute de tension dans la ligne d'utilisation, on peut :

1° prévoir des prises supplémentaires au transformateur d'alimentation, et, avec un commutateur analogue à un réducteur de batterie d'accumulateurs, augmenter, suivant les besoins, la tension aux bornes de la commutatrice.

Des commutatrices plus importantes sont pourvues, soit d'un *survolteur-alternateur*, en bout d'arbre, en série avec les tensions d'alimentation, soit d'un *régulateur de tension*[1].

2° effectuer le réglage du côté continu avec un survolteur, en bout d'arbre, en série avec la commutatrice;

3° compounder la machine en plaçant du côté alternatif une bobine de self de résistance négligeable dans chaque ligne d'alimentation et, du côté continu, quelques spires en enroulement additionnel sur les inducteurs de la commutatrice.

La sur-excitation des inducteurs par l'enroulement série ne diminue pas la vitesse de la machine et n'augmente pas directement la tension continue : comme dans le cas d'un moteur synchrone, elle déphase l'intensité alternative absorbée d'un angle φ en avant de la tension (fig. 6.) Dans ces conditions, puisque la f. é. m. de self $L\omega I$ est déphasée de $\pi : 2$ en arrière de l'intensité, la tension entre bagues U_1 est supérieure à la tension U_0 fournie par le réseau et la tension continue est augmentée.

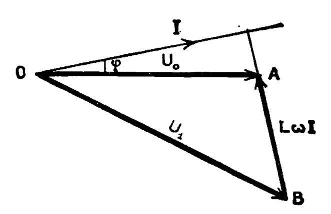


Fig. 6. — ***Compoundage d'une commutatrice :*** pour l'intensité I, décalée *en avant* de la tension aux bagues U_1, cette tension U_1 est supérieure à la tension U_0 du réseau.

7. Démarrage d'une commutatrice.

1° ***Démarrage par le côté continu.***

On effectue le démarrage comme celui d'un moteur shunt. Des lampes ou un indicateur de synchronisme indiquent quand la vitesse de régime est atteinte, on effectue alors le couplage et l'on supprime le rhéostat de démarrage.

2° ***Démarrage par un moteur auxiliaire.***

On démarre et on couple la machine comme un moteur synchrone et, parce qu'elle fonctionne pendant le démarrage comme une génératrice shunt (elle débite, en effet, dans le circuit d'excitation), sa polarité est déterminée par le magnétisme rémanent de ses pôles.

1. Un tel régulateur consiste :
soit en un *transformateur ordinaire à prises multiples*;
soit en un *régulateur d'induction*. C'est une sorte de transformateur dont le primaire est un stator de moteur asynchrone polyphasé branché en dérivation sur le réseau, et le secondaire formé par le rotor du moteur qui peut se déplacer, par commande à main, d'un double pas polaire dans le champ du stator.
Ce secondaire est intercalé entre le réseau et la commutatrice.
Des f. é. m. sont induites dans le rotor, à la fréquence du réseau, mais déphasées par rapport aux f. é. m. du réseau d'un angle qui dépend des positions relatives du rotor et du stator.
Elles s'ajoutent géométriquement aux f. é. m. du réseau. D'où la possibilité de varier la tension aux bagues de la commutatrice.

3° ***Démarrage en moteur asynchrone.***

Avec un auto-transformateur, on applique aux bagues une tension polyphasée progressivement croissante jusqu'à obtenir la vitesse de synchronisme, le circuit d'excitation ouvert. On ferme l'excitation et on couple sur le réseau.

Il arrive que la polarité obtenue est inverse de celle que l'on désirait : en actionnant plusieurs fois dans les deux sens un inverseur monté sur l'excitation, on réussit à rétablir la polarité voulue.

8. Commutatrice inversée.

C'est une commutatrice alimentée avec du courant continu et donnant à ses bagues des courants mono ou triphasés.

Cette machine fournit une fréquence variable avec la charge et cette fréquence se règle par le rhéostat d'excitation.

Un inconvénient plus grave que l'instabilité de la fréquence est le danger d'emballement de la commutatrice quand on lui demande, du côté alternatif, un courant réactif important dont le débit affaiblit le champ inducteur. Les commutatrices inversées doivent être munies d'un limiteur de vitesse à force centrifuge qui coupe le courant d'alimentation quand la vitesse s'accroît jusqu'à une valeur dangereuse.

Exercices.

1. Un réseau de distribution fournit une tension triphasée 115-200 *V* à 50 *p/s*. On désire du courant continu sous une tension de 115 volts produit avec une commutatrice de 50 *kW*.

Donner les spécifications des machines nécessaires pour cette transformation.

2. Une commutatrice alimentée par du courant continu sous 115 *V* fournit du courant monophasé et du courant triphasé. Combien faut-il de bagues? Quelles sont les tensions respectives entre bagues?

3. Une commutatrice triphasée de 300 *kW*, 550 *V*, est alimentée à 3 000 *V*, 50 *p/s*. Le rendement du transformateur est 0,95. celui de la commutatrice 0,92, le facteur de puissance 0,85.

Quelle est la tension aux bornes secondaires du transformateur?

Quelle est la tension primaire?

4. La machine d'extraction décrite sommairement dans la leçon extrait du minerai de fer à une profondeur de 319 mètres. Une benne est attachée à chaque extrémité du câble d'extraction et l'on peut admettre que le poids à vide de la benne qui descend équilibre le poids à vide de la benne qui monte. La charge utile est 9,6 tonnes. Le tambour d'enroulement a un diamètre de 5 mètres.

Quelle est la puissance utile, évaluée en *ch*, correspondant à la montée d'une charge quand le tambour tourne à 30 *tr/mn*.

On extrait 400 tonnes à l'heure, soit 42 cordées environ. Quelle est la puissance utile moyenne?

Quelle est la consommation d'énergie en *kWh* par tonne extraite si le rendement total de l'installation est 0,72?

5. Pour étudier un groupe formé d'un moteur asynchrone triphasé et d'une dynamo génératrice, on relève expérimentalement la caractéristique à vide de la génératrice excitée séparément. On obtient les résultats suivants :

i (en Ampères)	0	0,15	0,30	0,46	0,61	0,75	1,02	1,30	1,50
E (en Volts)	15	70	96	112	122,5	129	137	145	149
n (en tr/mn.)	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1430	1430	1430

Pendant ces mesures, deux wattmètres W_1 et W_2, montés suivant la méthode classique, indiquaient :

$W_1 = 22{,}5$ divisions W_2 : 10 divisions.

Ces wattmètres portent 150 divisions; ils sont branchés sur les sensibilités 10 *A* et 300 *V*, leurs connexions sont inversées.

On monte ensuite la génératrice en dynamo excitée en dérivation.

Pour $n = 1\,450$ *tr/mn*, la tension aux bornes est $U = 145$ *V*.

1° Tracer la caractéristique à vide de la machine pour $n = 1\,450$ *tr/mn*. Échelles : 1 *cm* pour 0,1 *A* et 1 *cm* pour 10 *V*.

Déterminer la résistance de l'enroulement inducteur.

2° On désire obtenir à vide une tension de 115 *V*. Quelle doit être la résistance du rhéostat d'excitation?

3° Quelle est la puissance absorbée par le moteur asynchrone pendant le relevé de la caractéristique à vide? Quel est alors son facteur de puissance?

4° On fait débiter par la dynamo excitée en dérivation une intensité de 13 *A* dans un circuit extérieur : il faut alors inverser les connexions du 2e wattmètre et les lectures sont : $W_1 = 69$ divisions et $W_2 = 32{,}5$ divisions. Calculer la puissance absorbée par le moteur et son facteur de puissance.

(*B. E. I. Électriciens. Paris* 1951).

6. DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

30e LEÇON

Étude sommaire de quelques compteurs usuels.

Les compteurs électriques enregistrent la consommation d'énergie des installations réceptrices. Les modèles de ces appareils sont très nombreux et diffèrent d'un constructeur à l'autre. Les plus employés ressemblent à l'un ou à l'autre des trois types que nous allons étudier.

A. COMPTEURS A COURANT CONTINU

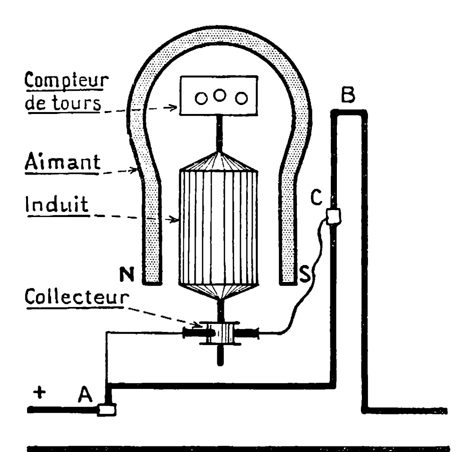


Fig. 1. — ***Compteur O'K.*** C'est un petit moteur à courant continu. Le réglage de la vitesse s'obtient en déplaçant le curseur mobile C.

I. Compteurs de quantité.

Le compteur O'K[1] est constitué par un gros aimant permanent entre les pôles duquel tourne un induit en tambour bobiné sur une carcasse en carton (fig. 1). L'axe vertical du tambour pivote à sa partie inférieure sur un rubis. Il se termine à la partie supérieure par une vis sans fin engrenant avec un compteur de tours. Le fil de l'induit est fin. Le tout petit collecteur (diamètre 3 *mm*) et les balais sont en métal inoxydable (argent).

1. Abréviation du nom de l'inventeur O'Keenan.

Ce compteur est en somme un petit moteur, genre magnéto, à induit sans fer.

L'induit est traversé par un courant i pris aux bornes d'un shunt AC. Soit R la résistance de la partie AC du circuit principal, I l'intensité du courant dans cette partie, égale pratiquement à l'intensité absorbée par l'installation; la tension aux balais du collecteur est $u = \mathrm{RI}$.

Le moteur tourne à vide, il ne renferme pas de fer, le courant y est très faible (de l'ordre de 2 milliampères), les frottements sont extrêmement réduits, il en résulte que sa puissance est infime et que sa f. c. é. m. est presque égale à la tension, u, qui lui est appliquée :

$$e = u = \mathrm{RI}.$$

Si Φ *Wébers* est le flux de l'inducteur, n le nombre de conducteurs de l'induit, N la vitesse en tours par seconde :

$$e = n\mathrm{N}\Phi.$$

Donc

$$\mathrm{RI} = n\mathrm{N}\Phi$$

soit

$$\mathrm{N} = \frac{\mathrm{R}}{n\Phi}\mathrm{I}.$$

Puisque n, Φ et R sont des constantes :

$$\mathrm{N} = k\mathrm{I}$$

et au bout du temps t, en régime constant :

$$\mathrm{N}t = k\mathrm{I}t.$$

Le nombre de tours de l'induit est proportionnel à la quantité d'électricité débitée par la ligne. Le compteur est un ***ampère-heure-mètre.***

Très généralement, la distribution de courant est faite à tension constante : le nombre de tours est aussi proportionnel à l'énergie absorbée. En intercalant des roues intermédiaires convenables dans la minuterie, les cadrans indiquent l'énergie consommée (fig. 2).

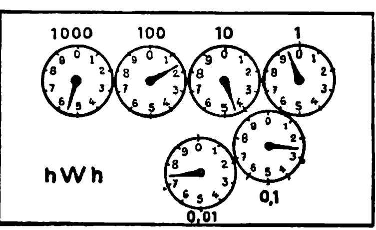


Fig. 2. — Cadran de compteur : il marque 5 149, 27 hwh. Lorsque l'aiguille est entre deux chiffres, c'est le chiffre inférieur qu'il faut lire. (Les graduations de certains cadrans ne sont pas représentées correctement. Quelle est l'erreur?)

Vérification et réglage. — Pour vérifier un tel compteur, on le monte en série avec un ampèremètre, un élément d'accumulateur et un rhéostat. On fait passer un courant de I ampères, mesurés à l'ampèremètre, pendant t secondes, mesurées avec un chronomètre. L'appareil a été traversé par It : 3 600 ampères-heures. Si U volts est la tension constante du secteur, tension pour laquelle l'appareil a dû être gradué, il a dû enregistrer une énergie de UIt : 3 600 watts-heures (à 3 % près).

Le réglage s'effectue en déplaçant dans le sens convenable le curseur C sur le shunt intérieur de l'instrument.

L'appareil doit démarrer au centième de sa charge normale.

2. Compteurs d'énergie électrique ou wattheuremètres

Examinons un compteur Thomson (fig. 3).

Un induit, en tambour, bobiné avec du fil fin sur une carcasse en carton, est monté sur un axe vertical; son collecteur de huit lames et ses balais sont en argent. A la partie supérieure de l'arbre, une vis sans fin commande une minuterie. A la partie inférieure est calé, sur l'arbre, un disque d'aluminium qui tourne entre les pôles de deux aimants permanents.

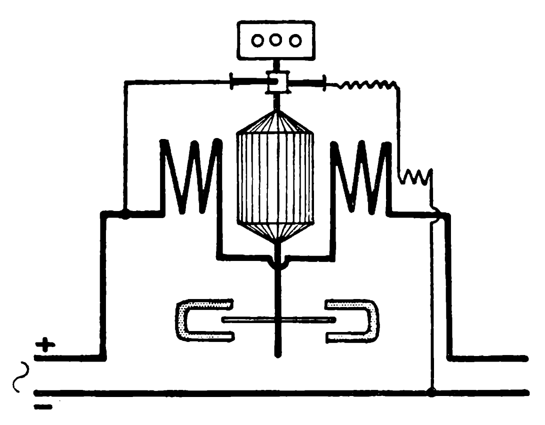


Fig. 3. — *Compteur wattheuremètre* ou *compteur d'énergie Thomson*. C'est un moteur à courant continu; l'inducteur est en série sur la ligne, l'induit en dérivation entre les deux fils de ligne. Il est freiné par les courants de Foucault induits dans le disque porté par l'axe.

Un inducteur est constitué par deux bobines à gros fil embrassant l'induit.

Le compteur est donc un petit moteur à courant continu, sans fer, entraînant un disque à courants de Foucault.

Les inducteurs sont traversés par l'intensité totale de l'installation. L'induit, avec une grande résistance en série, est monté en dérivation sur les deux fils de la distribution.

Nous savons que *le couple moteur d'un moteur à courant continu est proportionnel au flux inducteur* Φ *et au courant dans l'induit i.*

Or, les inducteurs du compteur étant sans fer, le flux Φ est proportionnel à l'intensité I qui les traverse et qui est celle du courant dans la ligne. D'autre part, l'induit tourne fort lentement (moins d'un tour par seconde), sa f. c. é. m. est négligeable, et l'intensité du courant qu'il absorbe est presque proportionnelle à la tension U aux extrémités de son circuit. Le *couple moteur* du compteur est donc proportionnel à UI, c'est-à-dire à la puissance consommée dans l'installation :

$$C_m = kUI.$$

Des courants de Foucault se produisent dans le disque d'aluminium qui tourne à N *tr/s* entre les pôles des aimants permanents. L'action des

aimants sur les courants ainsi induits crée un couple s'opposant à la rotation. Le flux des aimants est constant, le couple résistant est donc proportionnel à l'intensité des courants de Foucault.

Puisque le disque tourne en coupant un flux constant, la f. é. m. induite est proportionnelle à la vitesse N. Puisque la résistance des circuits des courants de Foucault dans le disque ne change pas, l'intensité de ces courants, comme la f. é. m. qui les produit, est proportionnelle à N. Donc le *couple résistant* est proportionnel à la vitesse du disque

$$C_r = k'N.$$

En marche normale, couple moteur et couple résistant sont égaux :

$$kUI = k'N.$$

Au bout d'un temps t, en régime constant,

$$N.t = \frac{k}{k'}UIt.$$

Le nombre de tours de l'induit du compteur est proportionnel à l'énergie consommée dans l'installation. Le compteur est un ***watt-heure-mètre***. Les cadrans de la minuterie sont gradués en *kWh*.

Les frottements de l'induit ralentissent la rotation aux faibles débits et le compteur marque alors trop peu. Ils empêchent aussi le démarrage pour les très faibles charges. On les compense en ajoutant aux bobines inductrices quelques spires en série avec l'induit : le moteur est compound.

L'énergie enregistrée par la minuterie pour un tour du disque se nomme la *constante* de l'appareil. Sa valeur est poinçonnée sur le carter du compteur.

Vérification et réglage. — Pour vérifier un tel compteur, pendant une durée de t secondes, mesurée avec un chronomètre, on fait passer un courant I, mesuré avec un ampèremètre, dans le circuit gros fil, et on applique une tension de U volts, mesurée avec un voltmètre, aux bornes du circuit à fil fin. Le compteur fonctionne comme s'il était traversé par UIt joules, ses cadrans doivent indiquer cette valeur à 3 % près. Il faut aussi que l'induit démarre au centième de la puissance nominale.

Le *réglage* s'effectue en déplaçant les aimants permanents freinant le disque. En les rapprochant du centre du disque, on diminue le freinage et le compteur tourne plus vite. Pour régler aux faibles charges, on déplace, par rapport à l'induit, la bobine inductrice de compoundage.

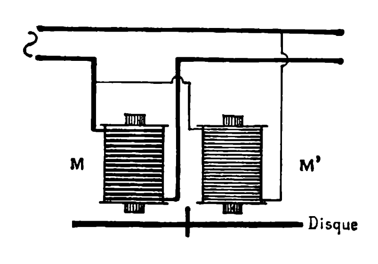
REMARQUE. — Il est possible d'utiliser un compteur à courant continu pour des intensités qui dépassent le calibre de l'appareil : il suffit de shunter le circuit intensité par une résistance convenable.

B. COMPTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

3. Compteurs à induction.

La construction de ces compteurs est surtout empirique. Leur théorie est compliquée et imprécise. Nous donnerons seulement le principe de ces appareils et un exemple de réalisation.

Sur un disque d'aluminium, pouvant tourner autour d'un axe vertical (fig. 4), agit un électro-aimant M à courant alternatif dont le noyau est vertical. Le flux alternatif induit dans le disque des courants de Foucault circulaires. Parce que ces courants sont symétriques par rapport à un plan contenant l'axe de l'aimant, aucun couple de rotation ne se produit.



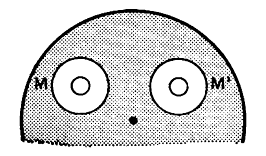


Fig. 4. — Schéma d'un ***compteur à induction.***
Le disque tourne sous l'action des forces électromagnétiques dues à l'action des champs magnétiques créés par les électros sur les courants de Foucault induits dans le disque.

Un second électro-aimant M′ est disposé à côté du précédent : il produit aussi des courants de Foucault.

L'électro M agit sur les courants dus à M′; de même M′ agit sur les courants produits par M : il en résulte un couple moteur qui est la somme algébrique des couples composants et, en général, le disque tourne.

Soient U la tension d'une distribution monophasée; I, l'intensité; φ, le déphasage de l'intensité sur la tension. L'un des électros est parcouru par le courant I, l'autre par un courant d'intensité proportionnelle à U et déphasé de $\pi : 2$ en arrière de U. Le couple moteur est alors proportionnel à $UI \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)$, soit $UI \cos\varphi$, par conséquent à la puissance de l'installation.

Pour obtenir cette proportionnalité, il est nécessaire :

1° que les noyaux des électro-aimants ne soient pas saturés pour que le flux y soit proportionnel au courant d'aimantation;

2° que le courant dans la bobine de tension soit déphasé exactement de $\pi : 2$ sur la tension.

Un modèle assez récent de compteur à induction monophasé est constitué par un électro-aimant feuilleté à trois branches avec une bobine sur le noyau du milieu (fig. 5). Cette bobine, à grand nombre de spires,

est très inductive. Elle est montée en dérivation entre les deux fils de ligne. L'intensité du courant qui la traverse est proportionnelle à la tension et déphasée en arrière de cette tension d'un angle voisin de $\pi : 2$.

Un autre électro-aimant en fer à cheval, feuilleté, est opposé au précédent. Il est excité par quelques spires de gros fil, enroulées sur les deux noyaux et parcourues par le courant total de l'installation.

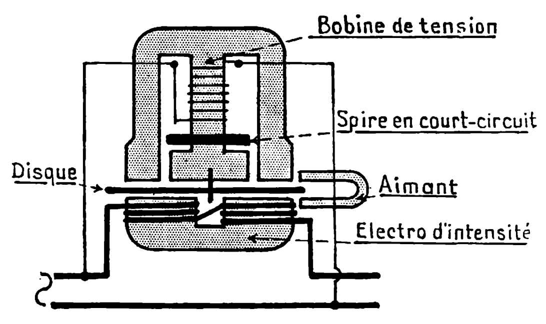


Fig. 5. — Schéma d'un ***compteur à induction.***

Entre les pôles des deux électros tourne un disque d'aluminium dont l'axe vertical commande la minuterie. Un aimant permanent que l'on peut approcher ou éloigner de l'axe du disque crée un couple résistant qui freine le mouvement de rotation comme dans le compteur Thomson.

La distribution du flux dans le disque à un instant donné est difficile à déterminer. On remarquera que, dans deux régions du disque, le flux d'intensité et le flux de tension sont superposés; en certains points, ils sont de même sens, en d'autres points de sens contraires. Ces dissymétries favorisent la rotation du disque.

Vérification et réglage. — Pour vérifier un tel compteur, on le monte en série avec un wattmètre de précision dans un circuit où l'on peut faire varier la puissance consommée et le facteur de puissance. Pour diverses valeurs de la puissance et du cos φ, l'énergie mesurée avec le wattmètre et un compte-secondes doit être égale, à 2 pour 100 près, aux indications du compteur. Il faut que le démarrage se produise au plus à un demi-centième de la puissance nominale.

On règle l'appareil au débit maximum et $\cos\varphi = 1$ en déplaçant l'aimant de frein dans le sens convenable. Le réglage dans le cas d'un courant fortement déphasé ($\cos\varphi = 0{,}3$) s'effectue en modifiant la résistance d'une bague en court-circuit qui entoure le noyau central de l'électro de tension : la diminution de la résistance augmente un peu le déphasage du courant dans l'électro sur la tension à ses bornes.

REMARQUE. — Un tel compteur peut servir pour de grandes intensités et des tensions élevées en l'alimentant avec un *transformateur d'intensité* et un *transformateur de tension.*

4. Compteurs polyphasés.

Dans le cas d'une installation **triphasée à trois fils**, le **compteur** comprend deux équipages qui agissent sur le même disque d'aluminium (fig. 6). Ces équipages sont branchés comme deux wattmètres : dans l'un, l'enroulement intensité est parcouru par le courant I_1 et la bobine tension est sous la tension U_{1-3}; dans l'autre, interviennent le courant I_2 et la tension U_{2-3}.

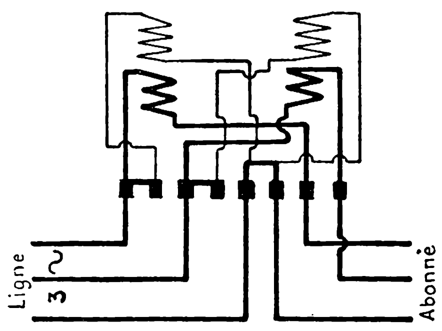


Fig. 6. — ***Branchement d'un compteur triphasé*** sur distribution à trois fils. Les connexions sont faites comme pour la méthode des deux wattmètres.

Si la distribution est en **étoile** à quatre fils, le compteur comporte **trois équipages** alimentés chacun par une phase et la tension simple correspondante; ils agissent sur le même arbre au moyen d'un ou **deux disques** d'aluminium.

5. Compteurs d'énergie réactive.

Pour obtenir un compteur monophasé **d'énergie réactive**, on construit le *circuit tension* pour qu'il soit *inductif et non résistant.* Le couple moteur de l'appareil est alors proportionnel à $UI \sin\varphi$, c'est-à-dire à la puissance réactive.

Un compteur à énergie réactive pour distribution triphasée à quatre fils est un compteur à énergie active dont le mode de branchement est modifié. Dans chaque équipage, le circuit intensité est traversé par une phase et la bobine tension correspondante est branchée entre les deux autres phases.

En effet, chacune des tensions composées est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension simple de la troisième phase . Chaque bobine de tension est alors branchée sur la tension $U \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$, soit $- U \sin\varphi$ au lieu de l'être sur $V \cos\varphi$. Le couple moteur est donc proportionnel à $UI \sin\varphi$, c'est-à-dire à la puissance réactive.

C. WATTMÈTRES, AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES A INDUCTION

6. Wattmètres à induction.

Ils sont construits sur le même principe que les compteurs.

Un type assez employé est constitué par une couronne en fer feuilleté à quatre pôles saillants; deux portent des spires de gros fils traversées par le courant total; les deux autres ont un enroulement à fil fin très inductif, en dérivation sur les deux fils de ligne (fig. 7).

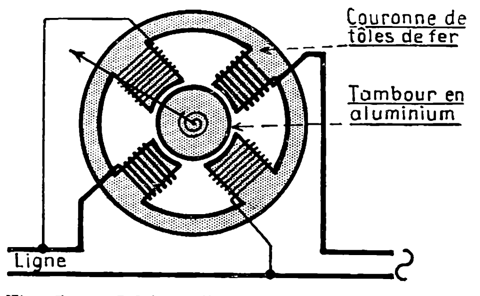


Fig. 7. — Schéma d'un *wattmètre à induction.*

Le champ dû aux bobines gros fil est en phase avec l'intensité, le champ des bobines fil fin est déphasé de $\pi : 2$ en arrière de la tension. Ces deux champs se composent en un champ tournant qui produit sur un tambour en aluminium un couple moteur proportionnel à I et à U $\cos\varphi$. Le couple de torsion d'un ressort spiral équilibre ce couple moteur. Une aiguille indicatrice repère la déviation du tambour qui dépend de la puissance à mesurer.

De tels wattmètres sont robustes, de faible consommation, mais sensibles à la forme et à la fréquence du courant et même à la température : ce sont des appareils de tableaux.

7. Ampèremètres et voltmètres à induction.

1. Il en est qui sont construits comme le wattmètre décrit au paragraphe précédent. Le courant amené à l'appareil s'y partage entre deux circuits dérivés, l'un résistant, l'autre inductif, et les champs produits se composent en un champ tournant qui agit sur un tambour en aluminium.

2. Le principe d'un autre type de construction plus simple est mis en évidence par l'expérience suivante.

Dans une bobine parcourue par un courant alternatif plaçons un noyau feuilleté dont une extrémité est fendue en fourche. Approchons cette extrémité d'un tambour d'aluminium monté sur un pivot : le tambour ne tourne pas.

Mettons autour d'une moitié du noyau une spire de cuivre en court-circuit dite *spire de Frager :* le tambour tourne.

Transportons la spire de Frager sur l'autre moitié du noyau : le sens de rotation est changé. En manœuvrant un rhéostat en série avec la bobine, nous constatons que la vitesse de rotation croît avec l'intensité du courant (fig. 8).

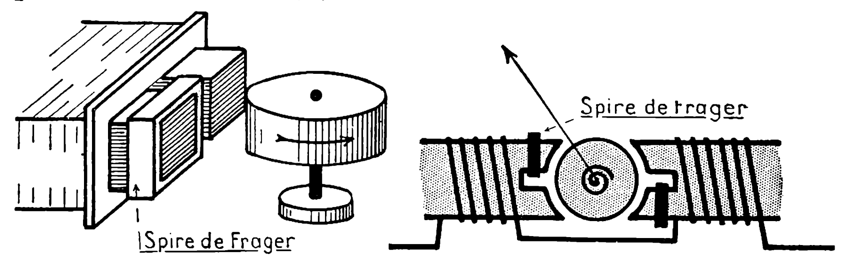


Fig. 8. — L'électro à courant alternatif muni d'une spire de Frager fait tourner un tambour d'aluminium.

Fig. 9. — Schéma d'un ampèremètre à induction.

Nous savons qu'une spire en court-circuit déphase le flux qui la traverse, en arrière du flux primitif, d'un angle compris entre O et $\frac{\pi}{2}$. De cette dissymétrie du flux dans le tambour en face du noyau résulte un couple moteur.

La figure 9 est le schéma d'un appareil de mesure réalisé avec deux noyaux à spires de Frager.

Exercices.

1. La résistance de l'induit d'un compteur O'K de calibre 5 A est 2,5 Ω, la tension aux bornes du shunt 0,5 *V*, le courant maximum dans l'induit 0,002 *A*. Quelle est la consommation de l'appareil à pleine charge?

2. Un compteur Thomson pour 5 *A* absorbe 0,015 *A* dans le circuit à fil fin sous 108 volts.

La tension aux bornes des inducteurs est 1 volt quand l'intensité en ligne est 5 *A*.

Quelle est la consommation de l'appareil, pendant 1 an, quand l'interrupteur de l'installation est ouvert?

Quelle est la consommation à pleine charge, pendant 1 an (moyenne d'utilisation 3 heures par jour)?

Le compteur étant bien réglé, le disque fait 36 *tr/mn* à pleine charge. Quelle est la constante du compteur?

3. Connaissant l'énergie active (5437 *kVh*) et l'énergie réactive (4365 *kVAr*) consommées pendant un mois, comment peut-on déterminer le cos φ moyen au cours de ce mois?

4. On lit, dans une police d'abonnement pour la fourniture d'énergie électrique, la clause suivante : « Dans le cas où le cos φ moyen serait supérieur pour un mois déterminé à 0,90, le prix du *kWh* serait diminué de 0,2 pour 100 par centième de cos φ de 0,90 à 1, sous la réserve que les dispositifs employés par l'abonné pour augmenter son cos φ seraient mis hors circuit chaque jour de 20 heures à 7 heures ». — Chercher les raisons pour lesquelles le secteur formule cette réserve?

Lignes à haute tension.

1. La production de l'énergie électrique est une industrie très importante.

En 1955, cette production a été, pour la France, de 49,5 milliards de kilowatt-heures, dont l'origine a été la suivante :

Centrales hydro-électriques 25,6 milliards de *k*W*h*
Centrales thermiques. . 23,9 milliards de *k*W*h*

En 1956, la production a été de 54 milliards de *k*W*h*.

L'accroissement de la demande d'énergie électrique se poursuit à un rythme de plus en plus rapide, de 8 à 9 % par an depuis le printemps 1953, supérieur à la cadence du doublement en 10 ans (fig. 1).

50 000
1955
49 400 MILLIONS de kWh
40 000
30 000
1946 24 386
20 000
ÉNERGIE PRODUITE
10 000
ANNÉES
0
1900 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55

Fig. 1. — ***Évolution de la consommation totale annuelle d'énergie électrique en France, de 1900 à 1955.***

2. Les centrales hydrauliques sont de types différents suivant la hauteur des chutes d'eau qu'elles exploitent.

a) Dans les *Pyrénées*, de nombreux lacs, à des altitudes élevées, constituent des réservoirs naturels contenant un volume d'eau considérable. Des tuyaux d'acier descendent cette eau pour alimenter, à plusieurs centaines de mètres plus bas, des turbines Pelton à axe horizontal qui tournent à 500, 600, 750 ou 1 000 tours par minute et entraînent des alternateurs.

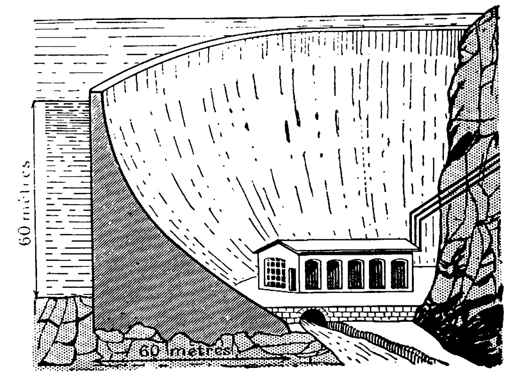


Fig. 2. — Coupe schématique du ***barrage d'Eguzon sur la Creuse.*** La centrale électrique est au pied du barrage.

Dans les *Alpes*, en fermant par des digues des vallées de torrents, on crée des lacs artificiels et on installe aussi des centrales à hautes chutes.

b) Dans le *Massif Central*, où les altitudes sont moindres, on a construit des barrages au travers des vallées de plusieurs rivières à cours rapide, comme la Creuse, la Truyère, la Dordogne; les lacs obtenus alimentent des turbines Pelton ou Francis sous des hauteurs de chute de 20 à 100 mètres (fig. 2 et 3).

Des travaux analogues ont été exécutés dans la vallée du Blavet, en Bretagne et dans la haute vallée du Rhône, à Génissiat (fig. 4).

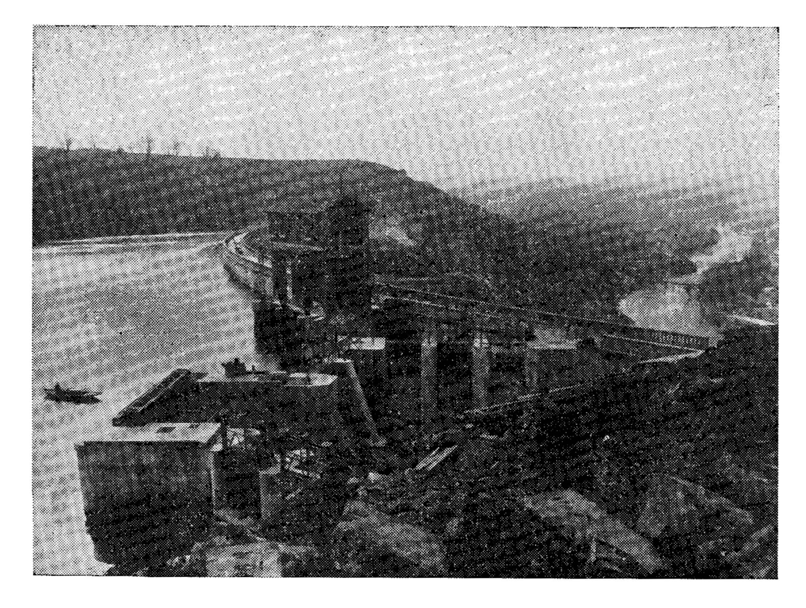


Fig. 3. — ***Barrage d'Eguzon, sur la Creuse.***

Hauteur de l'eau retenue :	60 mètres.
Longueur totale du barrage :	325 mètres.
Épaisseur au pied :	60 mètres.
Épaisseur au sommet :	6 mètres.

c) Il est aussi possible d'exploiter des chutes de quelques mètres seulement sur des cours d'eau à grand débit comme le Rhin à *Kembs*, le Rhône à *Jonage*, la Moselle. L'aménagement de ces centrales de basses chutes est souvent fort coûteux. On ne l'entreprend en général que s'il a en même temps une autre utilité, par exemple faciliter la navigation.

Le régime des cours d'eau alimentant les centrales hydrauliques varie suivant les régions. Le *régime glaciaire* est caractérisé par un débit

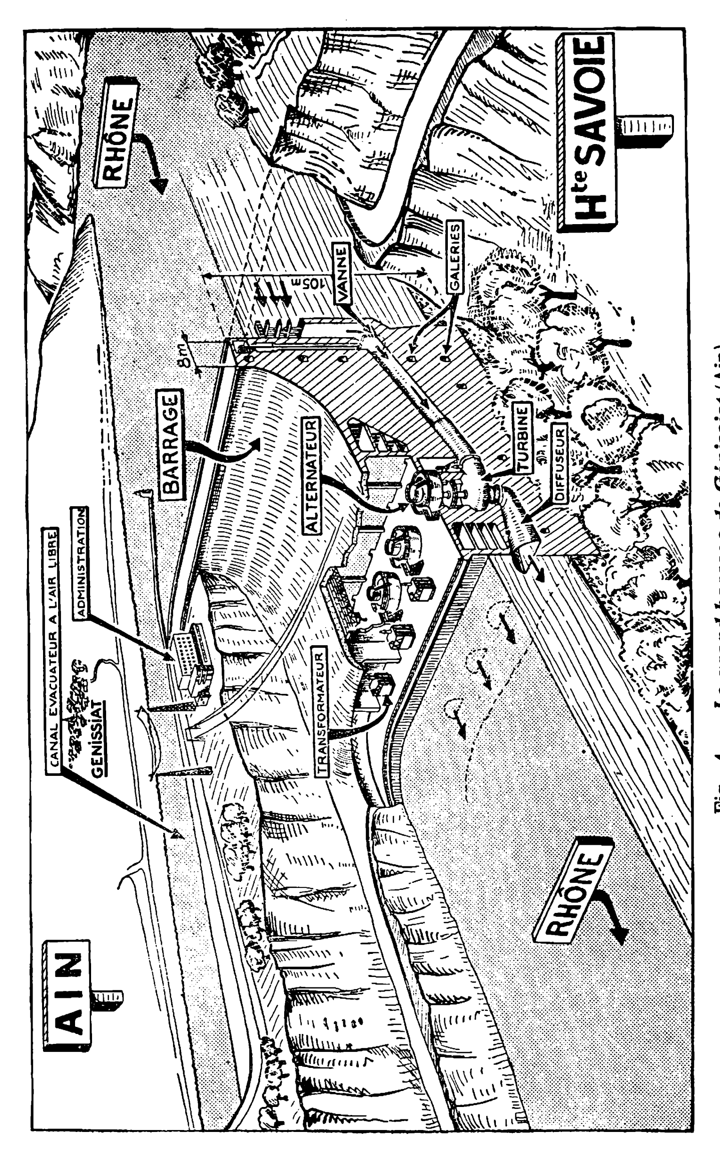


Fig. 4. — ***Le grand barrage de Génissiat*** (Ain).

Remarquez, à l'intérieur même du barrage, les groupes turbo-alternateurs qui engendrent le courant électrique.

des rivières maximum pendant l'été, quand la chaleur fond les glaciers et les neiges des montagnes.

Le *régime pluvial* est celui des altitudes moyennes : peu d'eau (étiage) pendant l'été et le début de l'automne, débit variable pendant le reste de l'année.

Le *régime mixte*, pour les fleuves alimentés dans le bassin de leur source par des neiges et plus bas par des pluies, comporte deux étiages plus ou moins marqués, l'un en hiver, l'autre à la fin de l'été.

Les centrales hydrauliques ne peuvent donc fournir une puissance constante; il faut les connecter entre elles pour que les régimes différents se compensent et même recourir à des centrales thermiques de secours ou d'appoint.

Dans les installations hydro-électriques, l'eau qui produit l'énergie ne coûte rien. Il ne faut pas en conclure que le prix de revient du kWh y est infime. Compte tenu de l'intérêt dû aux capitaux considérables dépensés en travaux d'aménagement, de l'amortissement des constructions et du matériel, des pertes dans le transport à grande distance de l'énergie, ce prix se rapproche de celui des grandes centrales thermiques.

3. Les centrales thermiques sont à vapeur ou à gaz.

a) Les centrales à vapeur comportent des turbines à vapeur entraînant des turbo-alternateurs. Dans les centrales modernes, la vapeur est produite avec des chaudières chauffées au charbon pulvérisé.

Le prix d'installation d'une centrale par kW, la consommation de charbon et les dépenses d'exploitation par kWh sont bien moindres pour de grandes puissances que pour de petites. Le kWh produit dans une centrale de 100 000 kW coûte trois fois moins que le kWh produit dans une centrale de 1 000 kW.

b) Les grandes usines métallurgiques produisent, dans leurs cokeries, d'importantes quantités d'un gaz dont la composition est presque celle du gaz d'éclairage. Par tonne de fonte fabriquée, leurs hauts fourneaux dégagent comme sous-produit environ 4 500 mètres cubes d'un gaz pauvre dont un tiers est disponible.

Le gaz des cokeries, celui des hauts fourneaux sont utilisés dans de grands moteurs à gaz qui commandent des alternateurs-volants à roue polaire très lourde.

4. Transport et distribution de l'énergie électrique.

Les centres de grande consommation d'énergie électrique sont les villes très peuplées et les régions très industrielles. Ils sont souvent éloignés des centres de production. Un réseau de lignes de transmission d'énergie relie les uns aux autres.

Nous avons montré (22e leçon) qu'un transport d'énergie électrique à grande distance n'est économique qu'à haute tension. A cause des

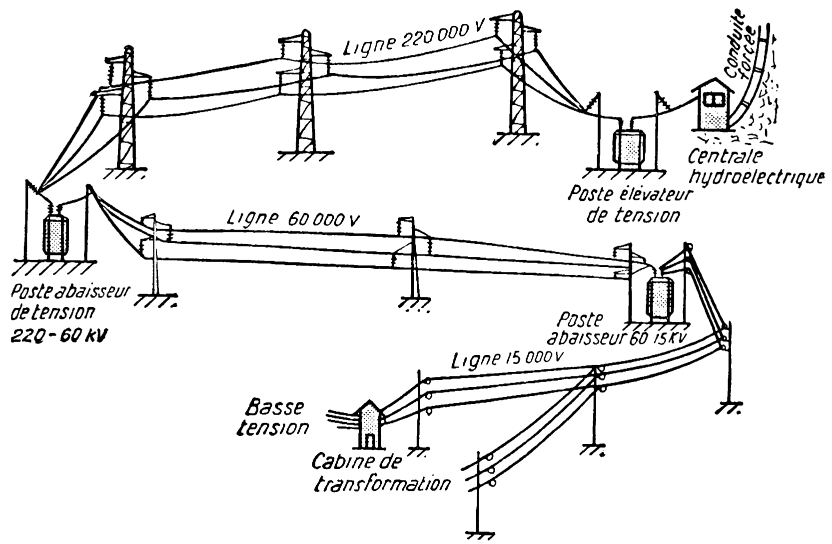


Fig. 5. — Schéma d'un ***transport d'énergie électrique à haute tension*** depuis la Centrale jusqu'à la cabine de transformation à la basse tension usuelle (120 ou 220 volts).

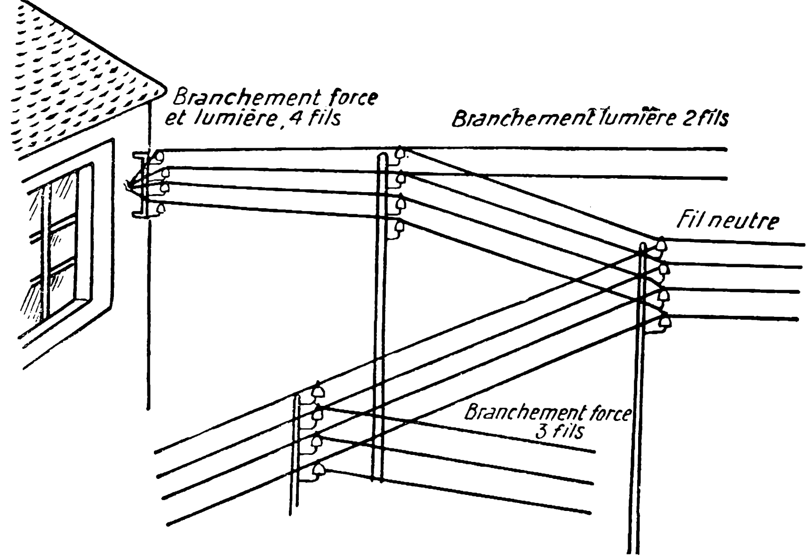


Fig. 6. — Schéma de ***distribution de l'énergie électrique à basse tension*** par lignes aériennes à 2, 3, et 4 fils.

facilités de transformation de la tension, on utilise des courants alternatifs triphasés.

En France, la transmission d'énergie à grande distance est faite à 220 000 *volts*. Le réseau national se compose d'une énorme boucle reliant entre eux les principaux centres de consommation et passant par les grands centres de production du Massif Central, c'est-à-dire, pour les premiers, Paris, Lyon, Saint-Étienne, le Creusot, pour les seconds Eguzon (Indre), Marrèges (Corrèze), Brommat-Sarrans (Aveyron). Des lignes joignent cette boucle aux centrales de production excentriques : Kembs, Génissiat, usines du Drac (Isère), région du Nord.

Des lignes régionales à 60 000 volts continuent la répartition. Les derniers postes de transformation sont souvent alimentés à 15 000 volts.

La fréquence est uniforme sur tout le réseau français : 50 périodes par seconde.

Certains consommateurs importants reçoivent du secteur l'énergie à 15 000 *volts*. Ils bénéficient d'un prix réduit et d'un règlement d'emploi très libéral.

Pour les abonnés ordinaires, la tension doit encore être réduite. Des *cabines de transformation* sont réparties dans les localités, parfois enclavées dans un bâtiment public. Elles contiennent un transformateur triphasé 15 000-127-220 volts avec un parafoudre et quelques appareils de manœuvre (fig. 5 et 6).

Le courant basse tension est livré aux particuliers soit par lignes aériennes, soit par câbles souterrains.

Les lignes aériennes sont à 4 fils dont 1 neutre. Une dérivation à deux fils, l'un branché sur une phase, l'autre sur le fil neutre, alimente les petites installations. Pour une installation avec lampes et moteurs, le branchement comporte 4 fils; trois fils, sans neutre, suffisent si l'installation ne comprend que des moteurs.

5. Les lignes à tension très élevée sont aériennes.

La figure 7 représente un pylône en cornière d'acier supportant une ligne triphasée à 220 000 volts.

Ce pylône est fixé au sol dans un massif en béton.

La ligne triphasée se compose de trois câbles aluminium-acier disposés à plus de 7 mètres les uns des autres. Chaque câble a une section de 294 mm^2. L'âme en est un toron de 7 fils d'acier galvanisé d'une grande résistance à la traction. L'extérieur est constitué par plusieurs couches de fils d'aluminium de bonne conductibilité électrique. La distance entre pylône est en moyenne de 750 mètres.

L'isolement de la ligne est assuré par des chaînes de quinze isolateurs en porcelaine.

Un câble d'acier de 70 mm^2 de section, nommé *fil de garde* ou *fil de terre*, attaché au sommet des pylônes, les relie tous entre eux et à des prises de terre.

6. Pertes et chute de tension dans une ligne triphasée.

Nous savons qu'interviennent dans le fonctionnement d'une telle ligne :

1° la *résistance ohmique* R qui produit une perte de puissance RI^2 et une chute de tension RI;

2° la *réactance inductive*, $L\omega$, qui cause une chute de tension $L\omega I$ sans perte de puissance active;

3° la *réactance de capacité*, $\frac{I}{C\omega}$, provoquant une chute de tension $\frac{I}{C\omega}$, sans puissance active perdue.

La résistance d'isolement de la ligne est grande mais n'est pas infinie; les courants de fuite produisent une perte d'énergie.

Dans le cas de très hautes tensions, une autre cause de pertes est la décharge par effluves qui s'effectue surtout à la surface des câbles de trop petit diamètre et les rend lumineux dans l'obscurité : c'est l'*effet couronne*. On l'atténue en employant des câbles d'une grosseur en rapport avec la tension.

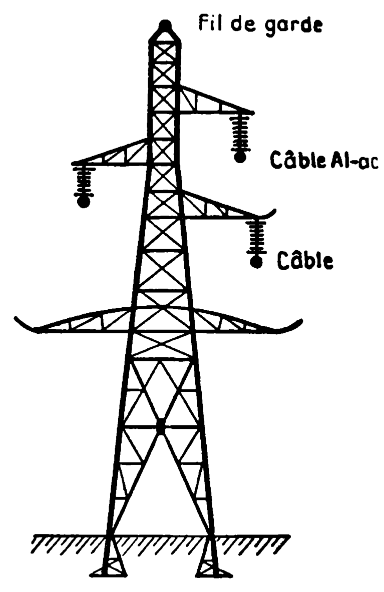


Fig. 7. — *Pylône d'une ligne à 220 000 V.* La hauteur totale hors du sol est de 35,80 m. Le poids du pylône dépasse 4 tonnes.

Cherchons, en négligeant les pertes dues aux fuites de courant et à l'effet couronne, quels doivent être la tension et le facteur de puissance au départ de la ligne triphasée précédemment décrite (§ 5), pour transporter à 100 kilomètres une puissance de 100 000 *kW* à l'arrivée, la tension étant 220 000 volts, le $\cos\varphi$ 0,85 ($\text{tg}\,\varphi = 0{,}619$).

Par kilomètre, un fil de ligne a une résistance de 0,11 ohm, une inductance de 1,4 millihenrys et une capacité de 0,008 microfarads.

1. La puissance réactive à l'arrivée a pour valeur

$$P_r = P\,\text{tg}\,\varphi = 100\,000 \times 0{,}619 = 61\,900 \ kVAr.$$

2. L'intensité en ligne, déduite de la formule $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$, est

$$I = \frac{100\,000\,000}{220\,000 \times \sqrt{3} \times 0{,}85} = 308 \ A.$$

Dans un fil de ligne de 100 *km* dont la résistance est R = 11 ohms, il se perd en chaleur Joule :

$$RI^2 = 11 \times 308^2 = 1\,043\,500\ W, \text{ soit } 1\,043\ kW$$

et dans les trois fils de la ligne triphasée :

$$1\,043 \times 3 = 3\,130\ kW.$$

L'inductance d'un câble de 100 *km* est L = 0,14 henrys, la réactance correspondante, $L\omega = 0{,}14 \times 314 = 44$ ohms, absorbe une puissance réactive de

$$L\omega I^2 = 44 \times 308^2 = 4\,175 \times 10^3\ VAr, \text{ soit } 4\,175\ kVAr$$

et pour les trois phases 12 525 *kVAr*.

Un fil de ligne de 100 *km* a une capacité de 0,8 μ F, donc une réactance de capacité de

$$\frac{1}{C\omega} = \frac{1}{0{,}8 \times 314 \times 10^{-6}} = \frac{10^6}{251} \text{ ohms}$$

donnant, sous la tension simple $\frac{220\,000}{\sqrt{3}}$, une puissance réactive

$$U^2C\omega = \frac{220\,000^2}{3} \times 251.10^{-6} = 4\,050\ kVAr$$

par fil et dans les trois 12 150 *kVAr*.

Au total, il faut fournir *au départ :*
une puissance active égale à

$$100\,000 + 3\,130 = 103\,130\ kW \simeq 103\,000\ kW$$

une puissance réactive qui est la somme de

la puissance réactive à l'arrivée :	61 900 *kVAr*
la puissance réactive de self de la ligne :	12 525 *kVAr*
la puissance réactive de capacité (négative) :	— 12 150 *kVAr*
soit	62 300 *kVAr* ≃ 62 000 *kVAr*.

La puissance apparente au départ est donc :

$$\sqrt{103\,000^2 + 62\,000^2} \simeq 120\,000\ kVA$$

le facteur de puissance est

$$\frac{103\,000}{120\,000} = 0{,}86$$

et la tension

$$\frac{120\,000}{308.\sqrt{3}} = 226\,000 \text{ volts.}$$

Le transport d'énergie est effectué avec une perte de 3 130 *kW*, soit 3,13 pour cent.

Remarque. — A cause de sa capacité, la ligne absorbe un courant à vide produisant la même puissance réactive qu'en charge, soit 12 150 *kVAr*. L'intensité de ce courant est environ 32 ampères.

7. Distribution par câbles armés souterrains.

Dans les villes, les distributions sous une tension de plusieurs milliers de volts sont faites par des câbles sous plomb en caniveaux ou enterrés.

Un câble triphasé sous plomb se compose de trois conducteurs formés d'un toron de fils de cuivre. Chaque conducteur est entouré de nombreuses couches de papier imprégné d'huile et de résine. Les trois sont torsadés ensemble avec interposition de jute pour former un cylindre. Une couche de rubans de papier entoure le tout. Par-dessus, une chemise de plomb épaisse de 2 à 3 *mm* est coulée d'une seule pièce. Le plomb est protégé par une armure de deux feuillards d'acier (fig. 8).

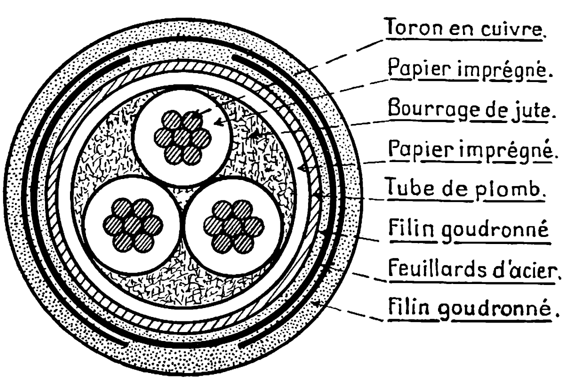


Fig. 8. — ***Câble armé à trois conducteurs.***

On fabrique de tels câbles pour servir jusqu'à 80 000 volts[1].

A cause de leur poids, il n'est guère possible de faire des tronçons de plus de 250 mètres de long. On connecte ces tronçons bout à bout avec des boîtes de jonction en fonte dans lesquelles les épissures de conducteur à conducteur sont isolées au papier et noyées dans un compound à base de brai coulé à chaud. Le raccord aux lignes aériennes est effectué par des boîtes de branchement emplies aussi de compound isolant.

La capacité d'un câble triphasé est environ 10 fois plus grande que celle d'une ligne triphasée de même importance et de même longueur. C'est une raison qui, jointe au prix élevé des câbles, limite leur emploi à des lignes de faible longueur.

Exercices.

1. Soit à transporter à 20 *km* une puissance de 25 *k*W en admettant une perte en ligne de 12 pour cent.

1° Quelle devrait être la section de la ligne en cuivre et son poids si l'on effectuait le transport avec une tension de 220 volts à l'arrivée? (densité du cuivre: 8,8 g/cm^3; résistivité : 2 microhms-centimètres).

1. Dans la banlieue de Paris, un transport, à courte distance, d'énergie à la tension de 220 000 volts est réalisé avec trois câbles unipolaires à l'intérieur desquels circule un lent courant d'huile.

2° La ligne utilisée est faite d'un câble de section 20 mm^2, qui pèse 187 *kg* par kilomètre et dont la résistance par kilomètre est 0,806 Ω.

A quelle tension doit être fait le transport pour ne pas dépasser le taux de perte de 12 %?

Quel est le poids total de la ligne?

(On négligera l'inductance et la capacité de la ligne.)

2. On a besoin dans une usine d'une puissance de 250 *kW*, $\cos\varphi = 0{,}8$, à fournir en courants triphasés, 50 *p/s*, à la tension de 200 volts.

Une chute d'eau de 50 *m* de hauteur existe à 20 *km* de l'usine.

En l'équipant avec une turbine de rendement 0,80; un alternateur de 300 *kVA*, dont le rendement est 0,90, pouvant donner de 200 à 230 volts à ses bornes, un transformateur élévateur de tension dont le rapport de transformation est 10 et le rendement 0,95; une ligne triphasée dont la résistance kilométrique par fil est 0,20 Ω et la réactance 0,20 Ω; un second transformateur identique au précédent, mais fonctionnant en abaisseur de tension; quel doit être le débit de la chute en litres par seconde pour fournir la puissance désirée?

3. La ligne triphasée décrite dans les paragraphes 5 et 6 de la leçon fournit à l'arrivée 10 000 *kW* sous la tension de 220 000 volts avec un facteur de puissance 0,90.

Quelle est la puissance envoyée dans la ligne au départ, la tension et le facteur de puissance?

4. Une ligne aérienne triphasée se compose de trois câbles en cuivre. La résistance par kilomètre de l'un des conducteurs est 0,11 Ω et sa réactance par kilomètre 0,3 Ω quand la fréquence du courant est 50 *p/s*. Calculer l'impédance par kilomètre de l'un des conducteurs de cette ligne.

On la remplace par deux lignes triphasées en parallèle dont la section de chaque conducteur est la moitié de celle d'un conducteur de la ligne primitive, la réactance kilométrique de chaque conducteur dépend très peu de sa section et reste à peu près 0,3 Ω. Calculer la nouvelle impédance obtenue.

Y a-t-il avantage à ce dédoublement de la ligne? Trouverait-on un avantage analogue à dédoubler une ligne de transport de courant continu?

5. Une installation électrique dont le facteur de puissance est 0,80 est alimentée par une ligne triphasée longue de 5 *km* faite d'un fil de cuivre, dont la résistance kilométrique est 0,31 Ω. La capacité de cette ligne est supposée négligeable. La tension au départ entre phases est 3 000 *V*, le courant dans la ligne 50 *A*, la fréquence 50 *p/s*. Déterminer la tension entre phases à l'arrivée :

1° en négligeant la réactance de self de la ligne;

2° en tenant compte de cette réactance dont la valeur, pour chaque conducteur, est 0,3 Ω par kilomètre.

Indications sur la solution. La tension étoilée au départ, $U = 3\,000 : \sqrt{3}$, est la somme géométrique de la chute ohmique dans un conducteur, RI, de la chute de tension réactive, $L\omega I$, et de la tension étoilée U′ de l'installation.

Soit la droite AX origine des phases. Portons sur AX, $\overrightarrow{AB} = RI$, puis $\overrightarrow{BC} = L\omega I$ en déphasant ce vecteur de $\pi : 2$ en arrière de AX, enfin traçons la direction de U′, CY faisant avec AX un angle φ tel que $\cos\varphi = 0{,}80$. Cette droite est coupée en D par un arc de cercle de centre A et de rayon AD = U; $\overrightarrow{CD}$ représente U′ à l'échelle adoptée, la tension entre phases cherchée est $U'\sqrt{3}$.

LECTURES

I. LE BARRAGE DE GÉNISSIAT (AIN) LE PLUS IMPORTANT DES BARRAGES EUROPÉENS.

Dans la région de Bellegarde, le Rhône est un véritable torrent contenu entre deux falaises abruptes; aussi a-t-on jugé cette région favorable à la construction d'une puissante usine hydro-électrique.

Un grand barrage a été établi de 105 m *de haut, large de* 100 m *à la base, de* 20 m *au sommet, créant un lac de retenue d'eau de* 23 km *de long et d'une capacité de* 53 millions de m³. *Au faîte du barrage, passe une route reliant les départements de la Haute-Savoie et de l'Ain.*

Commencée en 1939, *l'usine fut mise en service en* 1948. *Elle est logée dans le barrage lui-même. Elle comprend* 6 *groupes turbo-alternateurs : de* 65 000 kW *chacun et* 2 *de* 85 000 kW.

Une conduite forcée de 5,75 m *de diamètre alimente chaque turbine dont la roue est traversée par* 120 m³ *d'eau par seconde sous une hauteur de chute nette de* 60 *m.*

La puissance totale escomptée de 430 000 kW *pourra être portée à* 500 000 kW. *La production annuelle d'énergie électrique sera de l'ordre de* 1 800 millions de kHh.

II. LES TRAVAUX DE GRAND ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE : 116 MILLIARDS DE FRANCS EN 1956.

A. — *La société nationale* **Électricité de France (E. D. F.)** *a prévu une dépense de* ***73 milliards de francs*** *pour travaux d'équipement en* 1956, *travaux rendus indispensables par suite de l'accroissement de la consommation d'énergie électrique.*

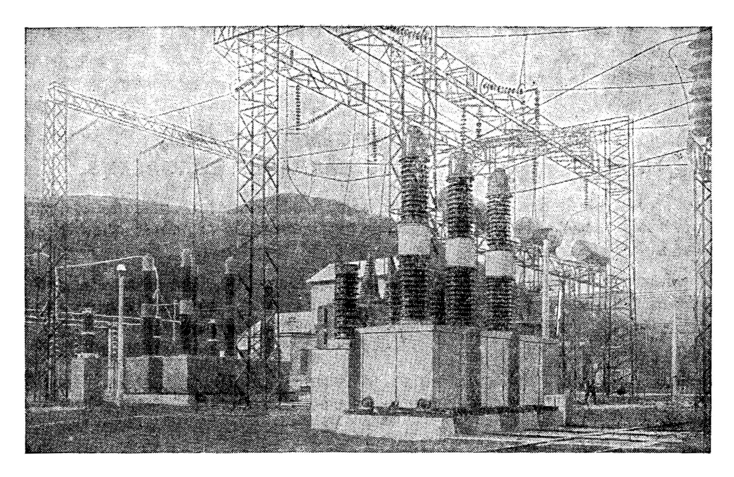
1° ***Poursuite des travaux en cours pour production d'énergie électrique :***
d'origine hydraulique : 4 600 millions de kWh
thermique : 2 000 millions de kWh.

2° ***Démarrage des travaux à engager en 1956 :***
hydrauliques : 2 270 millions de kWh *(chutes de Vogelgrün sur le Rhin, et de Monteynard sur le Drac; usine marémotrice sus la Rance).*
thermiques : 6 *groupes de* 115 000 kW.

3° ***Développement du réseau de transport d'énergie à haute tension :***

B. — ***43 milliards seront consacrés à la distribution*** *: exécution d'ouvrages neufs et de renforcement, intéressant notamment* 18 000 km *de lignes,* 3 700 *postes de transformateurs, etc.*

Ces dépenses intéressent des constructeurs de matériel électromécanique, et de nombreuses entreprises de travaux publics, ainsi que leurs fournisseurs (ciment, charpentes métalliques, ronds à béton, etc).



Vue du poste de transformation de Viviez (Aveyron).

En arrière : groupe de transformateur triphasé constitué par 3 transformateurs monophasés élevant la tension de 150 *kV* à 220 *kV*; puissance du groupe 30 000 *kVA*.

En avant : disjoncteurs dans l'huile, pouvoir de coupure 1 500 MVA.

Ce poste, situé entre deux groupes importants de Centrales, établit la liaison entre le groupe pyrénéen à 150 *kV* et le groupe du Massif Central à 220 *kV*.

Postes de transformation et appareillage à haute tension.

I. Voici quelques données précises sur une grande centrale électrique et sur son poste de transformation.

L'une des centrales hydrauliques les plus importantes d'Europe est celle de Kembs sur le Rhin, à une quinzaine de kilomètres en aval de Bâle.

La chute utilisée est de faible hauteur (16 m.) Le Rhin, à Kembs, est encore un fleuve de montagne au débit irrégulier variant de 350 m^3 à la seconde en février à 6 000 m^3 par seconde en juin. On a *régularisé* la puissance fournie par la centrale en se servant de deux lacs, dans les Vosges, à 70 kilomètres de Kembs : le lac Noir et le lac Blanc. Ces deux lacs sont à environ un kilomètre l'un de l'autre et l'altitude du lac Blanc dépasse d'environ 130 mètres celle du lac Noir. On a installé au lac Noir une usine reliée à Kembs par une ligne triphasée à 150 kilovolts. Cette

usine fonctionne en *réceptrice* quand le débit de Kembs est surabondant, elle pompe de l'eau dans le lac Noir et l'élève dans le lac Blanc. Elle devient *génératrice*, quand il est nécessaire, en utilisant la chute de l'eau ainsi remontée.

La puissance installée à Kembs atteint 238 000 kW. Elle est produite par des turbines et des alternateurs dont la tension est 8 800 volts. Les alternateurs alimentent un premier groupe de trois transformateurs de chacun 31 000 kVA élevant la tension de 8,8 kV à 150 kV et un second groupe composé de deux transformateurs de chacun 40 000 kVA et d'un transformateur de 65 000 kVA où la tension passe de 8,8 kV à 220 kV.

2. Le poste de transformation d'une centrale à très haute tension couvre une très grande surface.

Le poste de Kembs occupe 30 000 m², celui de Créney, près de Troyes, 45 000 m².

Pour de très hautes tensions, les conducteurs de phases différentes doivent, en effet, être éloignés de 4 à 5 mètres les uns des autres et de 3 à 4 mètres de tout support métallique relié à la terre. Il faut aussi écarter les uns des autres les transformateurs et les appareils de manœuvre et de sécurité.

De tels postes sont installés à l'extérieur, en plein air, et non dans des bâtiments.

La figure 1 est le schéma électrique d'une fraction de la partie à 220 kV du poste de transformation de Kembs.

En le parcourant de bas en haut, nous y remarquons les arrivées de courant sous 8 800 volts entre phases, l'un des transformateurs 8 800-220 000 volts, trois disjoncteurs sur chaque phase du secondaire. Par des sectionneurs, le courant est ensuite envoyé sur l'un ou l'autre de deux jeux de trois barres que l'on peut d'ailleurs coupler ensemble.

Sur ces barres sont branchées les lignes de départ par des *sectionneurs* et des *disjoncteurs*. Des *transformateurs de tension* et *d'intensité* pour appareils de mesure sont montés sur les lignes de départ ainsi que des selfs et des condensateurs de protection (un seul condensateur est indiqué sur le schéma).

Transformateurs et disjoncteurs sont placés sur le sol. Les deux jeux de barres sont tendus à 13 mètres de hauteur. Les barres sont constituées par des câbles de cuivre de 240 mm² fixés à une charpente en cornière par des chaînes de 16 isolateurs.

Les lignes de départ sont maintenues par un portique à 25 mètres de hauteur.

3. Par contraste, étudions un poste de transformation de faible puissance et à basse tension.

Nous savons que la tension entre les fils de la ligne de transport d'énergie est abaissée par des transformations successives à mesure que l'on

se rapproche des lieux d'utilisation. La dernière transformation s'effectue en général de 5 500 à 127-220 volts. La figure 2 représente une cabine de 250 kVA.

Cette cabine est en maçonnerie. La ligne aérienne à 5 500 V traverse

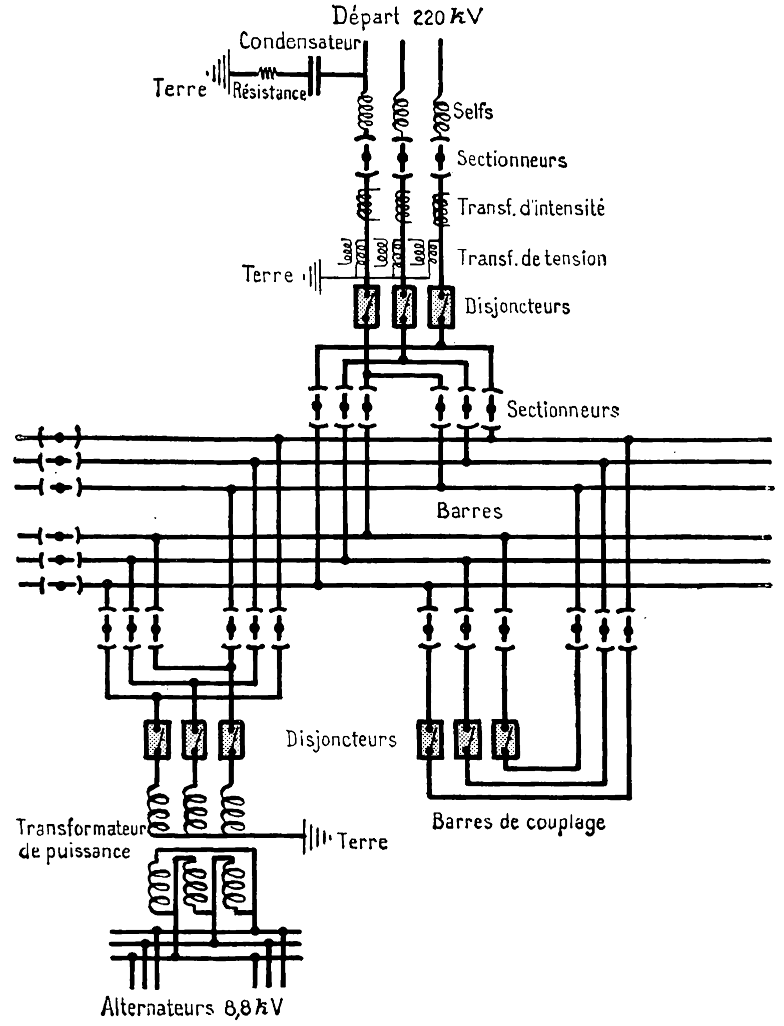


Fig. 1. — Schéma électrique d'une partie du *poste de transformation de Kembs* côté 220 *kV.*

le mur à la partie supérieure, chacun des trois fils au centre d'un disque en verre épais.

Quatre cellules en béton contiennent les appareils à tension élevée.

Après avoir traversé un sectionneur tripolaire et trois bobines de self, la ligne arrive à un disjoncteur tripolaire dans l'huile qui se trouve dans

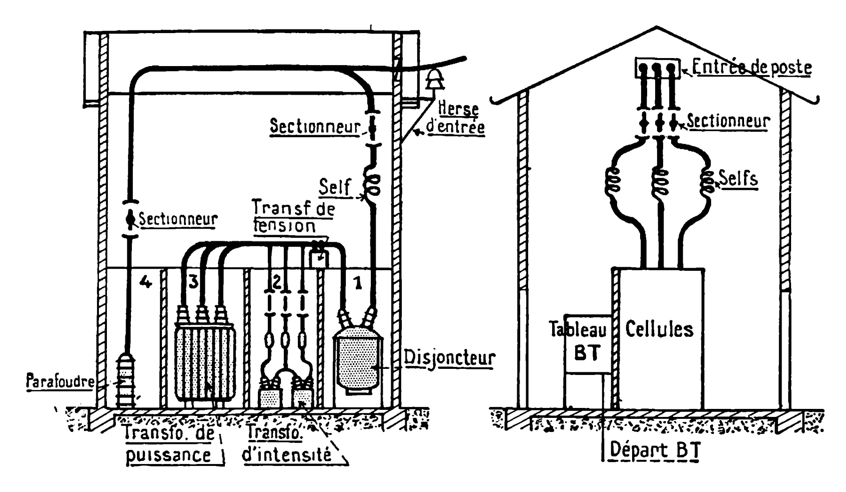


Fig. 2. — ***Poste de transformation 5 500-220 V.***

la cellule 1. Dans la cellule 2 sont deux transformateurs d'intensité et deux transformateurs de tension qui alimentent le compteur. La cellule 3 renferme le transformateur. Les quatre câbles du secondaire aboutissent aux coupe-circuit d'un tableau de distribution BT qui porte un voltmètre, un ampèremètre et trois interrupteurs tripolaires commandant chacun un départ à 127-220 volts.

La quatrième cellule est réservée aux parafoudres. On remarquera que la dérivation qui aboutit à ces appareils est prise sur la ligne à HT dès l'entrée du poste, avant les bobines de self.

4. Les appareils qui équipent les postes de transformation sont des appareils de manœuvres ou de sécurité.

Les disjoncteurs et les sectionneurs jouent le rôle d'interrupteurs : ce sont des *appareils de manœuvre*.

Les disjoncteurs, quand leur déclenchement est produit automatiquement par des relais, servent en même temps d'*appareils de sécurité;* s'y ajoutent des bobines de self, des condensateurs, des parafoudres et le fil de garde de la ligne.

Les accidents qui se produisent sur les réseaux sont dus à des *surtensions* ou à des *surintensités.*

Les *surtensions* résultent soit de perturbations atmosphériques, comme l'approche d'un nuage orageux ou un coup de foudre direct, soit de changements brusques apportés au réseau, comme le branchement ou la mise hors circuit d'une ligne. Une telle manœuvre produit, en un temps très court, une modification de la tension en ligne. Le phénomène, parfois amplifié par la résonance, se propage sur la ligne à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde; on lui donne le nom d'*ondes de choc* ou *d'ondes à front raide.* Il risque de provoquer le « claquage » des premières bobines des transformateurs qu'il rencontre.

Les *surintensités* sont causées par des contacts accidentels entre fils de ligne ou des fausses manœuvres dans les installations réceptrices.

5. Les disjoncteurs sont des interrupteurs à coupure brusque dans l'huile.

La coupure d'un courant intense dans une installation à haute tension ne doit pas être effectuée dans l'air. A la séparation des contacts, il se

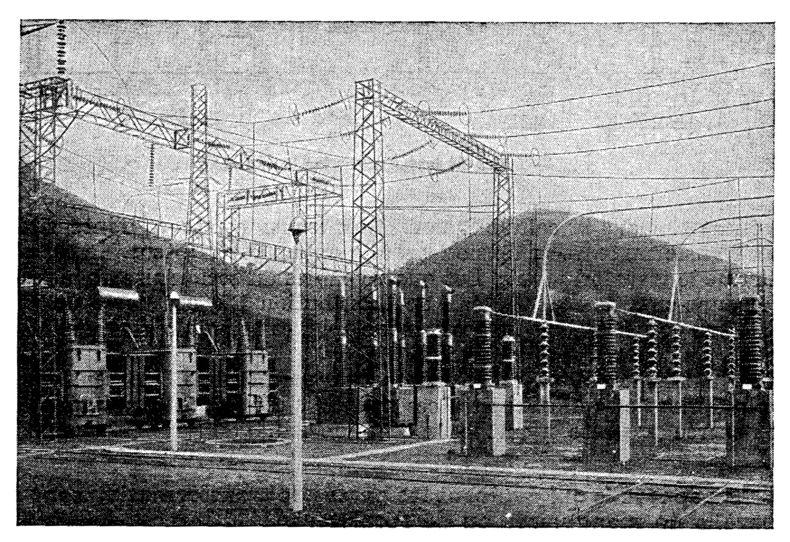


Fig. 3. — Vue des ***disjoncteurs d'un poste de transformation haute tension*** poste de Viviez (Aveyron).

produit en effet un arc dont la longueur atteint plusieurs mètres quand la tension dépasse 100 kV : les contacts seraient détruits avant qu'on ait pu les éloigner assez pour éteindre l'arc.

On effectue la rupture dans l'huile. La chaleur dégagée par l'arc vapo-

rise de l'huile, mais les vapeurs formées sont fortement refroidies par le liquide qui les entoure et l'arc s'éteint beaucoup plus vite que dans l'air.

Dans le cas d'une installation triphasée dont la tension n'est pas très élevée, un seul bac à huile suffit pour les trois phases du disjoncteur. S'il s'agit d'une très haute tension, on emploie trois disjoncteurs unipolaires (fig. 3).

La figure 4 représente, en le simplifiant beaucoup, un tel disjoncteur. Le bac à huile cylindrique, en tôle soudée, peut atteindre deux mètres de hauteur. L'intérieur est isolé. Le courant est amené à deux grandes bornes en porcelaine, creuses et remplies d'huile. Le conducteur qui traverse chaque borne aboutit, dans une chambre de rupture en matière isolante, à des contacts annulaires rapprochés par des ressorts.

Les contacts mobiles sont deux tiges creuses, en bronze, réunies par une entretoise en cuivre fixée à l'extrémité d'une barre en bois bakélisé taillée en crémaillère qu'un pignon fait monter et descendre. Des ressorts bandés à l'enclenchement se détendent brusquement au déclenchement et séparent très rapidement l'équipage mobile et les contacts fixes.

Les gaz produits par l'arc qui jaillit dans la chambre de rupture y déterminent un courant d'huile refroidissant les contacts.

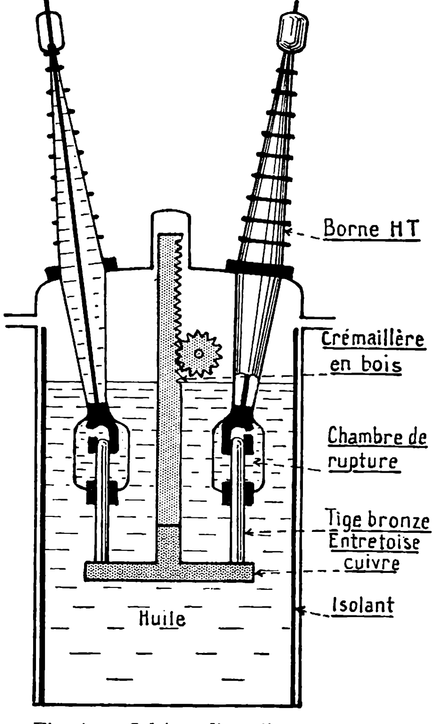


Fig. 4. — Schéma d'un ***disjoncteur HT.***

Les disjoncteurs sont parfois commandés à la main. Les plus puissants sont enclenchés par des électro-aimants ou par un petit moteur électrique. Souvent le déclenchement est provoqué par un relais fonctionnant quand l'intensité atteint un maximum fixé.

6. Relais.

Parmi les nombreux types de relais, décrivons un relais d'induction à déclenchement retardé et maximum d'intensité.

Comme un compteur d'induction, il comprend deux électros-aimants opposés l'un à l'autre. Les deux circuits sont branchés en parallèle sur un transformateur d'intensité. Le circuit B est plus inductif que le circuit C. Les courants qui les parcourent, et par conséquent les flux qu'ils produisent, sont déphasés l'un par rapport à l'autre. Dans certaines régions de l'entrefer ces flux s'ajoutent, dans d'autres ils se retranchent. Les courants induits dans un disque d'aluminium D mobile autour de l'axe EF (fig. 5) provoquent la rotation du disque. Un contrepoids P attaché à une cordelette enroulée autour de l'axe s'oppose à ce mouvement.

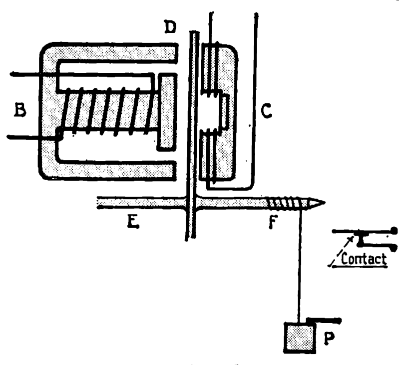


Fig. 5. — Schéma d'un *relais d'induction temporisé.*

Quand le courant atteint une intensité assez grande, le couple créé dans le disque dépasse le moment du contrepoids. Le disque tourne, le poids s'élève et agit sur un contact électrique qui déclenche le disjoncteur soit par émission, soit par coupure d'un courant.

L'action du relais n'est pas instantanée. Sa rapidité dépend de l'importance de la surintensité et de la longueur de la cordelette du contrepoids.

7. Les sectionneurs ne sont manœuvrés qu'à vide.

Ce sont des couteaux avec lesquels on relie ou l'on sépare les unes des autres les différentes parties d'un réseau.

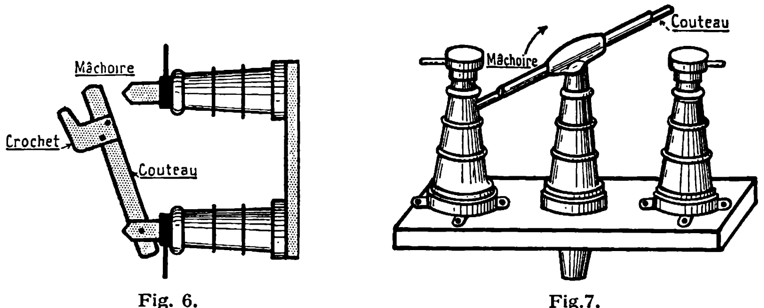


Fig. 6. Fig.7.

Fig. 6. — ***Sectionneur unipolaire*** à commande par perche. Il ne doit être ouvert que si le courant est déjà coupé par un disjoncteur.
Fig. 7. — ***Sectionneur rotatif*** unipolaire.

Un modèle ressemble à un grand interrupteur unipolaire sans rupture brusque (fig. 6). On le manœuvre avec une perche isolante à crochet.

Sur les lignes à très hautes tensions, on emploie souvent des sectionneurs rotatifs. Un tel sectionneur se compose de trois isolateurs montés dans un même plan vertical (fig. 7); les isolateurs extrêmes qui sont fixes portent chacun une mâchoire; l'isolateur central tourne autour de son axe, il est muni d'un couteau qui, pour la position « fermée », réunit les deux mâchoires.

Les sectionneurs comportent parfois, dans la position « ouvert », une mise à la terre de l'une des mâchoires.

Les *disjoncteurs* à rupture brusque dans l'huile permettent de couper les circuits *en charge*, alors que les *sectionneurs* ne doivent être manœuvrés qu'*à vide*, c'est-à-dire après la mise hors-circuit de tous les récepteurs sur la partie du réseau qu'ils commandent, ou après l'ouverture des disjoncteurs. ***L'ouverture d'un sectionneur sous courant est une fausse manœuvre dangereuse.***

8. Les parafoudres et limiteurs de tension protègent les installations contre les surtensions.

Le *fil de garde*, qui réunit les sommets des pylônes d'un transport d'énergie à haute tension et qui est connecté de distance en distance à des prises de terre soignées, préserve plus ou moins la ligne des coups de foudre directs et aussi de l'influence des nuages électrisés.

On y adjoint des *parafoudres*, surtout à l'entrée des postes de transformation. Une installation de parafoudre comprend, du côté du poste, *une bobine de self*. C'est une bobine sans fer de 25 à 60 spires de très gros fil dont l'inductance est de 0,2 à 0,6 millihenry (fig. 8). La réactance d'une telle bobine est faible pour les courants de fréquence industrielle, elle est grande pour les courants à haute fréquence qui résultent d'une décharge atmosphérique. Ces courants à fréquence élevée sont dérivés dans le parafoudre branché avant la self.

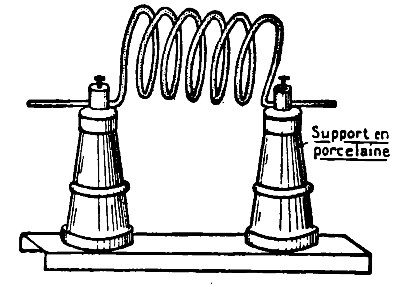


Fig. 8. — ***Bobine de self-induction pour ligne à haute tension.*** **(La bobine comporte en réalité environ 60 spires.)**

Un modèle de parafoudre que l'on emploie de moins en moins est le *parafoudre à cornes* (fig. 9). Ces cornes sont en un al-

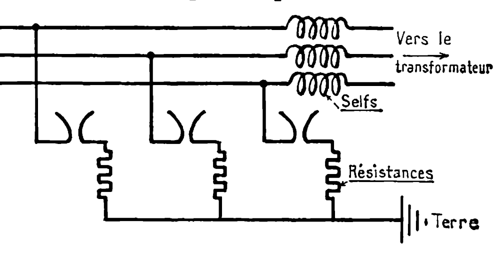


Fig. 9. — **Installation de *parafoudres à cornes*.**

liage à base de zinc. Quand la tension de la ligne par rapport au sol est trop grande, un arc jaillit entre les cornes dans la région où elles sont très rapprochées, puis s'élève le long des cornes et s'éteint quand il est très allongé. Pendant quelques instants la ligne est mise à la terre par l'arc et une grande résistance liquide.

Un autre type de parafoudre, dit *autoclave*, est constitué par une pile de cartouches formées de disques résistants (3 *mm* d'épaisseur), séparés les uns des autres par un anneau plat en mica (0,1 *mm* d'épaisseur). On compte un disque par 200 volts de tension efficace de la ligne à protéger. La décharge se produit sous forme d'effluves dans les intervalles d'air que le mica maintient entre les disques (fig. 10).

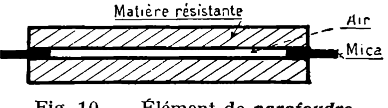


Fig. 10. — Élément de ***parafoudre à effluves.***

On utilise aussi des *parafoudres limitateurs de tension à rouleaux.* Ces rouleaux sont des cylindres en un alliage à base de zinc avec un gaufrage en pointes sur toute leur surface. Ils sont fixés sur un support isolant à 1 ou 2 millimètres les uns des autres, en nombre d'autant plus grand que la tension de la ligne est plus élevée (fig. 11). Le premier rouleau est relié à la ligne, le dernier à la terre avec une résistance importante en série. Dans le cas d'une surtension, des arcs s'amorcent en cascade entre les rouleaux et, parce que la tension entre les extrémités de chacun n'est pas très grande, ils s'éteignent rapidement.

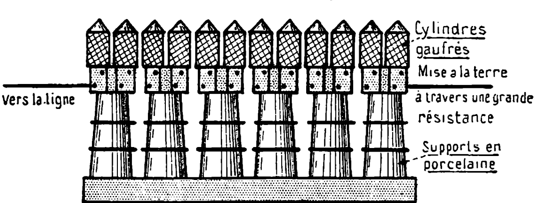


Fig. 11. — ***Parafoudre à rouleaux.***

Dans le schéma du poste de Kembs (fig. 1), on remarque que les *parafoudres* sont des *condensateurs* dont une armature est reliée à la ligne et l'autre à la terre. La capacité de ces condensateurs est faible; leur réactance de capacité, qui est inversement proportionnelle à la fréquence, est très grande pour les courants à fréquence industrielle et faible pour les décharges atmosphériques à haute fréquence dont l'écoulement dans le sol est ainsi possible.

Ces différents moyens de protection sont efficaces. Les « pannes de courant » sont rares sur les grands réseaux de distribution d'énergie électrique. Toutefois, chacun a pu constater que les perturbations causées par les orages n'y sont pas entièrement supprimées.

Exercices.

1. Une centrale hydraulique alimente une usine distance de 50 kilomètres. La puissance consommée est 5 000 *kW*, la tension à l'arrivée 20 000 *V* entre fils et le facteur de puissance 0,90.

La perte en ligne est 20 % de la puissance produite par la centrale.

Dans le cas de courant monophasé, calculer :

a) la puissance perdue en ligne,
b) l'intensité dans la ligne,
c) la résistance d'un fil de ligne,
d) sa section,
e) le poids total de cuivre pour l'ensemble de la ligne,
f) la tension au départ.

La résistivité du cuivre est 2 microhms-centimètre, sa densité 8,8 g/cm^3.

On négligera l'inductance et la capacité de la ligne.

2. Même problème dans le cas où le transport d'énergie est fait par courants tr - phasés avec trois fils de ligne. Tension entre fils à l'arrivée : 20 000 volts.

3. Dessiner le schéma du poste de transformation décrit dans le paragraphe 3 de la leçon.

Lignes à basse tension.

1. Les tensions d'utilisation les plus employées sont 125 et 220 volts.

Pour réduire les pertes dans les lignes, il y a intérêt à distribuer l'énergie à la tension la plus élevée possible.

Mais il faut tenir compte des conditions de fonctionnement des récepteurs les plus nombreux, qui sont les lampes à incandescence. Les lampes à basse tension sont plus robustes, moins chères et de meilleur rendement que les lampes de même puissance à tension plus élevée. La tension de 125 volts est la plus pratique pour l'éclairage. Des réseaux anciens à 220 ou 230 volts existent encore dans certaines villes.

D'autre part, l'intensité lumineuse diminue très vite quand la tension aux bornes d'une lampe s'abaisse au-dessous de la tension normale. Une variation de tension de 5 pour cent en plus ou en moins est le maximum qui puisse être toléré.

Donc, une distribution à basse tension a pour but, en partant des dynamos s'il s'agit de courant continu, de la cabine de transformation s'il s'agit de courant alternatif, d'amener, au tableau de contrôle de l'usager, une tension qui restera constante à 5 pour cent près, quel que soit le nombre des lampes en service.

Une ligne à basse tension comprend :

la canalisation publique aérienne ou souterraine qui dessert tous les abonnés sur son trajet;

le branchement extérieur jusqu'au coupe-circuit principal de l'immeuble;

le branchement intérieur et, s'il y a lieu, la colonne montante et les dérivations à chaque étage jusqu'aux compteurs des appartements.

2. Calcul élémentaire d'une ligne de distribution.

a) Ligne à courant continu.

Soit une canalisation principale ABC (fig. 1), *alimentant les abonnés D, E, F.* $AB = 100\ m$, $BC = 20\ m$, $CD = 40\ m$, $CE = 25\ m$, $BF = 30\ m$. *D consomme* 10 *A*, *E*, 15*A* et *F*, 8*A*. *La tension en A est* 115 *V. Proposons-nous de déterminer les différentes sections des lignes pour que la chute de tension en D, en E et en F soit de* 5 *volts. — Résisute du cuivre :* $1{,}8 \cdot 10^{-6}\ \Omega . cm$.

Prenons comme inconnue auxiliaire la densité de courant $d = \frac{I}{s}$ dans les différents conducteurs. Pour une portion de conducteur de longueur l de section uniforme s :

$$R = \rho\frac{l}{s} \qquad RI = \rho l\frac{I}{s} = \rho ld.$$

1° Calculons d'abord les sections des trois tronçons de la ligne principale ABCD *en admettant sur toute cette ligne la même densité de courant.*

La chute de tension entre A et D est :

$$RI = \rho d(2\,AB + 2\,BC + 2\,CD).$$

Puisque RI = 5 volts et la résistivité du cuivre $\rho = 1{,}8.10^{-6}$ ohms.cm :

$5 = 1{,}8.10^{-6} \times d \times (200.10^2 + 40.10^2 + 80.10^2)$, d'où $d = 87$ *A par cm²* ou 0,87 *A par mm²*.

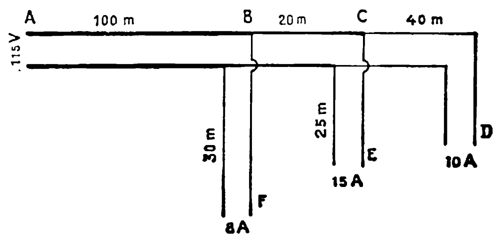


Fig. 1. — Distribution à courant continu avec trois postes d'abonnés.

Dans le tronçon AB, I = 33 A, donc $s = 38$ *mm²* dans la partie BC, I = 25*A*, donc $s = 29$ *mm²*; dans la partie CD, I = 10A, donc $s = 11{,}5$ *mm²*.

2° Pour calculer la section du branchement BF, déterminons la chute de tension de A à B et, par suite, la chute de tension entre B et F.

La chute de tension entre A et B est :

$$u = \rho ld = 1{,}8.10^{-6} \times 200.10^2 \times 87 = 3{,}12\ V.$$

Donc entre B et F la chute de tension à obtenir est $u' = 5 - u = 1{,}88\,V$.

La densité de courant dans la ligne BF sera telle que :

$$1{,}88 = 1{,}8\ 10^{-6} \times d \times 60.10^2.$$

soit : $d = 174$ *A : cm²* ou 1,74 *A/mm²*.

Pour une intensité de 8 *A*, la section du fil sera 4,6 *mm²*.

Un calcul analogue donne pour CE une section de 7,8 *mm²*.

Remarque. — Dans aucun cas, pour éviter un échauffement excessif du conducteur, la densité du courant adoptée ne doit dépasser les limites fixées par l'Union des Syndicats de l'Électricité, savoir :

jusqu'à 5 mm² :	5 *A : mm²*,
de 6 à 15 mm² :	4 —
de 16 à 50 mm² :	3 —
de 51 à 100 mm² :	2 —
de 101 à 200 mm² :	1,5 —
au-dessus de 200 mm² :	1

b) ***Ligne à courant alternatif.***

La perte de puissance active dans la ligne est due à la résistance ohmique.

La chute de tension est produite par l'impédance de la ligne.

De plus, l'inductance et la capacité de la ligne modifient le déphasage de l'intensité sur la tension.

Les lignes en basse tension sont courtes en général, et l'on néglige leur self et leur capacité.

1° *Ligne monophasée.*

La puissance nécessaire au compteur est $P = UI \cos\varphi$. L'intensité du courant a pour valeur $I = \frac{P}{U \cos\varphi}$.

Le calcul de la section de la ligne s'effectue comme dans le cas de courant continu.

2° *Ligne triphasée.*

La puissance à amener au compteur étant $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$, l'intensité en ligne est :

$$I = \frac{P}{U\sqrt{3}\cos\varphi}.$$

La chute ohmique de tension dans un conducteur est RI et entre bornes d'arrivée $RI\sqrt{3}$.

3° *Comparaison d'une ligne triphasée à une ligne monophasée.*

La même puissance est transportée à la même distance sous la même tension, avec la même chute de tension, par du courant monophasé et par des courants triphasés. Quel est le rapport des sections totales de conducteurs employés?

Supposons, pour simplifier, que le facteur de puissance soit égal à l'unité. Soit l la longueur de la ligne, P la puissance, U la tension entre phases, u la chute de tension.

Dans le cas d'une *ligne monophasée*, $P = UI$, d'où $I = \frac{P}{U}$. Pour que la chute de tension soit u, il faut que

$$u = \rho\frac{2l}{s}I, \qquad \text{soit} \qquad s = 2\rho\frac{lP}{uU}.$$

La somme des sections des deux fils de ligne est :

$$S = 4\rho\frac{lP}{uU}.$$

Dans le cas d'une *ligne triphasée à trois fils*

$$P = UI_1\sqrt{3} \qquad \text{et} \qquad I_1 = \frac{P}{U\sqrt{3}}.$$

Pour que la chute de tension entre phases soit u, il faut qu'elle soit $\frac{u}{\sqrt{3}}$

entre l'origine et la fin d'un fil de ligne de longueur l. La section s_1 de ce conducteur est telle que

$$\frac{u}{\sqrt{3}} = \rho \frac{l}{s_1} I_1, \qquad \text{soit} \qquad s_1 = \rho \frac{l}{u} I_1 \sqrt{3} = \rho \frac{lP}{uU}$$

soit pour les trois conducteurs :

$$S_1 = 3\rho \frac{lP}{uU}.$$

Le poids du cuivre employé pour la ligne triphasée à trois fils est donc les 3/4 du poids de la ligne monophasée.

Quand le transport est fait par une *ligne triphasée à quatre fils sous la tension U entre phases et neutre*, $P = 3UI_2$ et $I_2 = \frac{P}{3U}$.

La chute de tension dans un fil de phase est u, la section s_2 de ce fil est déterminée par la relation

$$u = \rho \frac{l}{s_2} I_2 \qquad \text{soit} \qquad s_2 = \rho \frac{l}{u} I_2 = \rho \frac{lP}{3uU}.$$

La somme des sections des trois fils de phase est $\rho \frac{lP}{uU}$. Supposons que le fil neutre ait la même section que les fils de phase, alors qu'une section moindre est suffisante en général, la section totale des quatre fils de ligne est

$$S_2 = \frac{4}{3}\rho \frac{lP}{uU}.$$

Conclusion. — Le poids de la ligne triphasée quatre fils est *trois fois plus petit* que le poids de la ligne monophasée; il est les 4/9 du poids de la ligne triphasée à 3 fils, c'est-à-dire *un peu moins de la moitié.*

REMARQUE. — Si la ligne triphasée avec fil neutre est aussi avantageuse, c'est parce que la tension entre phases y est $U\sqrt{3}$ au lieu de U.

3. Distribution de courant continu à plusieurs fils.

Pour modifier la section totale d'une ligne de distribution, sans modifier la tension entre les bornes des récepteurs, on emploie parfois une *distribution à trois fils.*

Par exemple, on réalise une distribution à 115 V en montant en série deux dynamos shunt entre deux fils de ligne A et B avec un troisième fil C dit *fil neutre* ou *fil d'équilibre* ou *fil compen-*

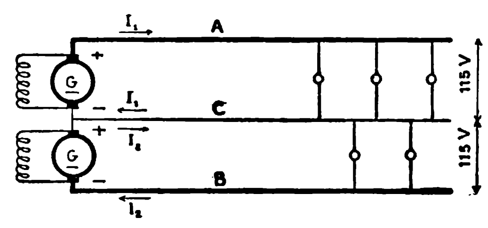


Fig. 2. — *Distribution à trois fils* : les circuits AC et CB se nomment les ponts de la distribution.

sateur branché sur le pôle commun des deux génératrices (fig. 2). L'intensité dans le fil neutre est la différence des intensités I_1 et I_2 dans les fils de ligne, aussi donne-t-on à ce fil neutre une section qui est seulement la moitié de celle des fils principaux.

Fig. 3. — *Distribution à trois fils avec compensatrices.*

Si S est la section d'un conducteur, la somme des sections des trois fils est 2,5 S.

Si les deux dynamos étaient séparées pour une distribution par deux lignes à deux fils, la somme des sections des quatre fils serait 4S.

Le poids de la première ligne n'est donc que les 5/8 du poids de la seconde.

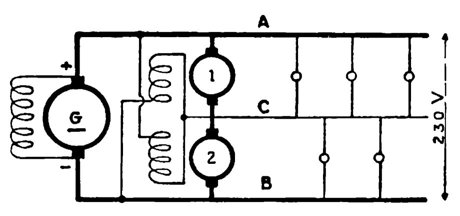


Fig. 4. — Les excitations des compensatrices sont croisées.

L'emploi de deux génératrices shunt en série est à éviter. Il faut craindre qu'à la mise en marche, l'une des machines s'amorce avant l'autre; un renversement du courant dans les inducteurs de la machine en retard est alors possible.

On utilise une génératrice à 230 volts et l'on monte, entre les deux ponts, deux moteurs shunt à 115 volts dont les induits sont calés sur le même arbre (fig. 3). Ces machines se nomment *compensatrices*.

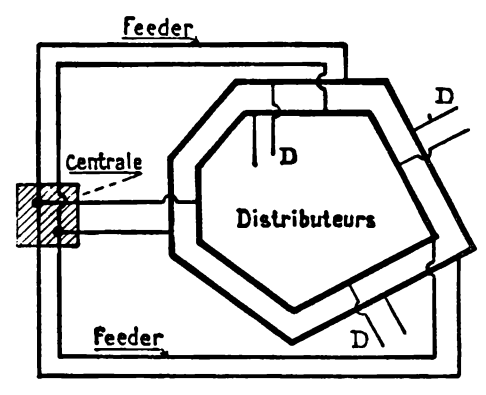


Fig. 5. — *Distribution par feeders.*

Si les deux ponts sont équilibrés, les compensatrices tournent en moteurs à vide.

Si le pont AC est moins chargé que l'autre, la tension U_1 correspondante est plus grande que la tension U_2. La compensatrice 1 tend à tourner plus vite que l'autre qu'elle entraîne. La compensatrice 2 fonctionne comme une génératrice, débite dans le pont CB et rétablit partiellement l'équilibre.

Le fonctionnement est encore amélioré si l'on branche l'excitation de 1 sur le pont CB et l'excitation de 2 sur le pont AC (fig. 4).

4. Distribution par feeders.

Ce mode de distribution de courant continu consiste en un réseau, en général fermé, de conducteurs D nommés *distributeurs* qui desservent dans tous les sens les branchements des abonnés.

Des lignes, appelées *feeders*[1], réunissent différents points du réseau à la centrale (fig. 5). A la centrale, on cherche à maintenir une tension constante dans les distributeurs en utilisant pour leur alimentation un nombre plus ou moins grand de feeders.

La chute de tension dans les feeders est sans conséquence pour les abonnés qui sont branchés sur les distributeurs dont la tension ne varie pas.

Exercices.

A. Un alternateur monophasé (50 *p/s*), dont la tension aux bornes, assimilable à la f. é. m., peut être considérée comme sinusoïdale,

$$e = E_m \cos \omega t, \qquad (1)$$

est destiné à alimenter, à une distance de 10 *km*, un groupe récepteur de 1 200 lampes à incandescence; les caractéristiques d'une lampe sont les suivantes :

200 volts de tension efficace,
50 bougies,
0,8 watt par bougie.

Pour faciliter la transmission, le courant, au départ, passe dans un transformateur élévateur de tension, dont le rapport de transformation est égal à 10. A l'arrivée un second transformateur, identique au premier, abaisse la tension à sa valeur primitive, abstraction faite des pertes.

La capacité et la self-induction de tout le circuit sont supposées négligeables. Sachant que l'on consent une perte de 20 p. 100 en ligne et que chaque transformateur occasionne une perte de tension de 2 p. 100 sans perte d'intensité, on demande :

1° la tension efficace U entre les bornes de l'alternateur et la puissance P qu'il fournit, en kilovolts-ampères;

2° la puissance P_1 dépensée dans les lampes et le rendement η de l'installation.

3° Expliquer numériquement l'équation (1).

4° Calculer le poids de cuivre nécessaire à l'établissement de la ligne.

B. A l'alternateur monophasé dont il vient d'être question, on substitue un alternateur triphasé (50 *p/s*), dont les enroulements sont connectés en étoile; les f. é. m. ou les tensions aux bornes dans chaque enroulement sont :

$$e_1 = E_m \cos \omega t$$
$$e_2 = E_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$e_3 = E_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

1. Le mot anglais *feeder* signifie nourrisseur.

Les deux transformateurs monophasés sont également remplacés par deux transformateurs triphasés, dont les enroulements sont aussi associés en étoile, et dont le rapport de transformation est encore égal à 10.

Les pertes de tension en ligne et dans les transformateurs étant les mêmes (20 % et 2 %) que dans le cas précédent, et les lampes réceptrices étant elles-mêmes groupées en étoile (trois branches contenant chacune 400 lampes), on demande de même :

1° la tension efficace U entre les bornes de l'alternateur.

2° Expliciter numériquement les équations (2).

3° Montrer que la puissance disponible dans une section quelconque du circuit est $P = UI\sqrt{3}$, où U est la tension efficace entre bornes correspondantes ou entre fils de ligne dans cette section, et I l'intensité efficace correspondante.

4° Calculer la masse *m* de cuivre nécessaire à l'établissement de la ligne et la comparer à la précédente.

Nota. — On fera un schéma de l'installation dans les deux cas et on adoptera, d'après les conventions admises, les notations suivantes :

u, *e*, *i*, tension, f. é. m., intensité à un instant donné;

U_m, E_m, I_m, valeurs maxima de ces quantités en courant sinusoïdal;

U, E, I, valeurs efficaces;

P, puissance.

On donne : résistivité du cuivre = 2 *microhms-cm*;

densité $d = 8{,}8$ g/cm³.

On rappelle que dans un bon transformateur la tension aux bornes du secondaire est en opposition de phase avec la tension aux bornes du primaire.

On rappelle également qu'en courant sinusoïdal, les valeurs efficaces sont égales aux valeurs maxima divisées par $\sqrt{2}$.

Concours général des Lycées
(Classe de Mathématiques élémentaires).

Tableaux de distribution et appareillage à basse tension.

I. Le tableau de contrôle des petites installations réceptrices est très simple.

La ligne, presque toujours bifilaire, qui apporte l'énergie électrique à une petite installation réceptrice telle que l'installation d'éclairage d'un appartement, aboutit à un petit tableau de contrôle qui comporte,

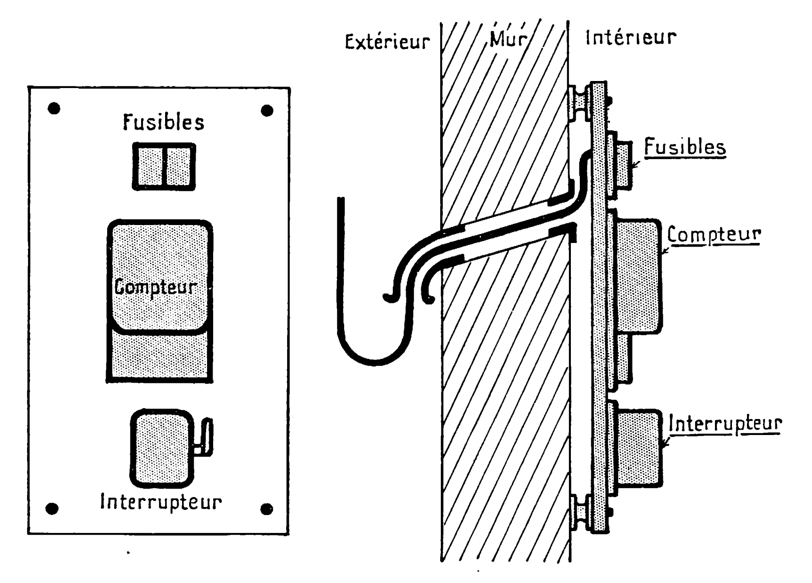


Fig. 1. — ***Entrée de poste et tableau d'arrivée d'une petite installation d'éclairage.***

sur un panneau de bois ou de métal, deux fusibles, un compteur et un interrupteur bipolaire (fig. 1). Fusibles et compteur sont plombés pour que l'abonné ne puisse prendre de courant qu'*après* le compteur.

2. Les tableaux de distribution des installations réceptrices importantes sont plus ou moins compliqués suivant les installations.

On y groupe des appareils de *manœuvre*, de *sécurité* et de *mesure* dont le nombre et la nature varient d'un tableau à l'autre.

A. Soit, par exemple, un tableau de distribution de courants triphasés desservant, dans une École, la salle de cours d'électricité et la salle des essais.

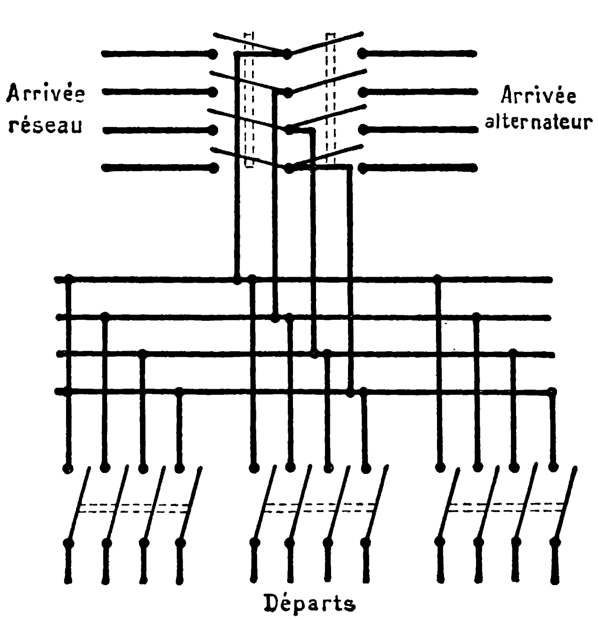


Fig. 2. — Schéma des connexions du tableau de distribution figure 3.

Du tableau général de l'établissement, arrive une ligne triphasée à quatre fils qui amène 15 *kVA* sous 220 *V* entre phases. Le courant peut aussi être fourni par un alternateur triphasé qui produit 15 *kVA* sous 220 *V* entre phases, à la fréquence soit de 25, soit de 50 périodes par seconde. Ce courant est ensuite envoyé dans une ligne à quatre fils vers la salle de cours et dans deux lignes vers la salle des essais.

a) Le tableau porte donc comme *appareils de manœuvre* (fig. 2) :
1° *un commutateur inverseur tétrapolaire,*
2° *trois interrupteurs tétrapolaires.*

b) Les *appareils de mesure*, abondants parce qu'il s'agit d'une installation d'enseignement, sont :
un fréquencemètre, F,
un phasemètre, φ
un voltmètre V qu'un *commutateur bipolaire* branche à volonté entre chacune des phases et le fil neutre ou entre deux phases,
trois ampèremètres, soit un sur chaque phase,
un wattmètre W,

c) Comme *appareils de sécurité*, sont employés :

un disjoncteur tripolaire déclenchant à maximum d'intensité sur deux phases ou à minimum de tension entre le neutre et la troisième phase;

des fusibles tétrapolaires sur chacun des trois départs.

On a cherché à donner bel aspect au tableau (fig. 3). Les appareils sont disposés sur la face avant d'un panneau de marbre bleu et les connexions sont placées derrière.

Le panneau de marbre, prolongé jusqu'au sol par une tôle, est monté sur un châssis en fer cornière scellé à une distance du mur de la salle suffisante pour que l'on puisse accéder facilement à l'arrière du tableau.

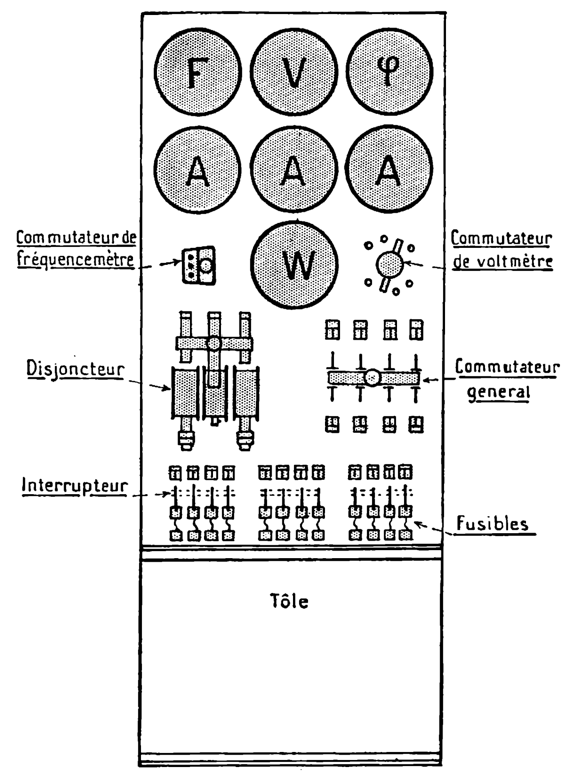


Fig. 3. — ***Tableau de distribution de courants triphasés*** pour une école technique.

B. Des tableaux de distribution comportent moins d'appareils de mesure, mais plus d'appareils de manœuvre que celui que nous venons de décrire. C'est le cas de deux tableaux qui flanquent le précédent, à droite et à gauche. L'un, affecté à un groupe moteur-générateur, porte le rhéostat de démarrage du moteur triphasé et les rhéostats de champ de deux génératrices compound; l'autre contrôle un alternateur et son moteur de commande, il porte le rhéostat de démarrage et le rhéostat de réglage de la vitesse d'un moteur shunt, ainsi que le rhéostat d'excitation de l'alternateur.

Les résistances et les plots de ces rhéostats sont dissimulés derrière les panneaux de marbre, les volants de manœuvre apparaissent seuls sur la face antérieure du tableau.

C. Le mode d'exécution des tableaux de distribution diffère souvent de celui qui vient d'être indiqué. On préfère parfois au marbre des panneaux de tôle peinte ou martelée. Les appareils de mesure y sont encastrés, les cadrans seuls sont légèrement saillants.

La *disposition en pupitre* est commode quand il s'agit de tableaux où les appareils sont fréquemment manœuvrés.

3. Les disjoncteurs protègent les circuits principaux des installations de moyenne et grande puissance.

Nous avons étudié dans des leçons antérieures les instruments de mesure que l'on monte sur les tableaux de distribution, ainsi que les appareils de manœuvre.

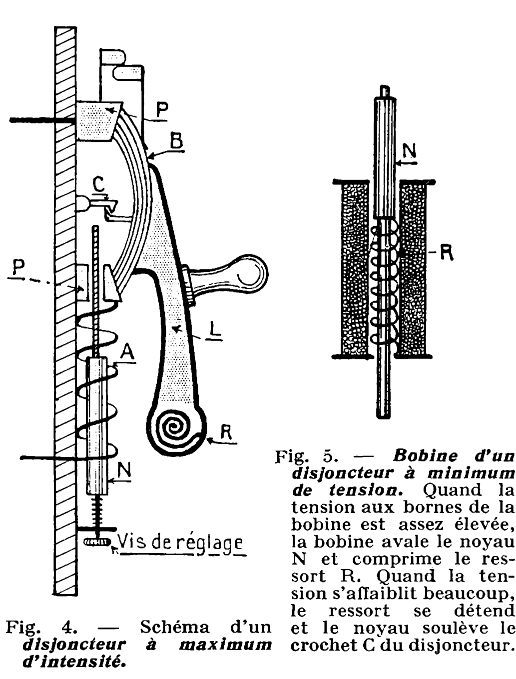


Fig. 4. — Schéma d'un ***disjoncteur à maximum d'intensité.***

Fig. 5. — ***Bobine d'un disjoncteur à minimum de tension.*** Quand la tension aux bornes de la bobine est assez élevée, la bobine avale le noyau N et comprime le ressort R. Quand la tension s'affaiblit beaucoup, le ressort se détend et le noyau soulève le crochet C du disjoncteur.

Comme appareils de sécurité, dans les circuits où l'intensité dépasse plusieurs dizaines d'ampères, on emploie des disjoncteurs déclenchant, soit à maximum d'intensité, soit à minimum de tension.

Un modèle très usité de *disjoncteur à maximum d'intensité* (fig. 4) se compose d'un interrupteur à balais B appliqué sur des plots P par un levier qu'un ressort R rappelle à sa position d'ouverture. L'interrupteur est maintenu fermé par un crochet C.

Une bobine à gros fil A est traversée par le courant de l'installation. Elle est munie d'un noyau plongeur N en fer doux, massif pour courant continu, feuilleté pour courant alternatif, prolongé par une tige aboutissant sous le crochet C d'enclenchement du disjoncteur.

Quand l'intensité du courant dans la bobine dépasse une certaine valeur, le noyau est aspiré, sa tige frappe le crochet C, le soulève et le disjoncteur déclenche. L'étincelle de rupture du courant jaillit entre deux contacts de zinc ou de charbon qui sont placés à la partie supérieure de l'appareil.

Le disjoncteur se règle en modifiant la position de repos du noyau.

Dans un *disjoncteur à minimum de tension*, la bobine est faite de fil fin (fig. 5) et branchée entre deux fils de ligne. Quand l'enroulement est sous tension, le noyau qui se trouve à la partie supérieure de la bobine est avalé et comprime un ressort à boudin. Si la tension aux bornes de la bobine diminue beaucoup ou s'annule, le noyau est attiré moins fortement, le ressort le repousse, le noyau vient soulever le crochet qui retient le levier de l'interrupteur.

Un disjoncteur doit posséder autant d'organes de coupure distincts que l'installation comporte de conducteurs. Dans un disjoncteur tripolaire, en général l'une des bobines est à minimum de tension, les deux autres à maximum d'intensité.

Un tel disjoncteur protège une installation contre :
1° les court-circuit;
2° les surintensités;
3° pendant l'arrêt de fonctionnement qui suit un manque de tension, donne le temps de ramener à la position de départ tous les démarreurs des moteurs afin d'éviter un à-coup de courant au moment du rétablissement de la tension en ligne.

4. Un moteur est mal protégé par des fusibles ou par un disjoncteur tel que celui qui vient d'être décrit.

Nous savons qu'un moteur, qu'il soit à courant continu ou à courant alternatif, absorbe au démarrage une intensité plus grande qu'en fonctionnement normal. Le disjoncteur doit être réglé, les fusibles doivent être choisis pour supporter le courant de démarrage. Il en résulte que le moteur n'est pas protégé dans le cas d'intensités supérieures à la normale, mais inférieures à l'intensité de démarrage qui, si elles durent assez longtemps, échauffent les enroulements et les détériorent.

Un mode de protection efficace est l'insertion dans le circuit de *déclencheurs thermiques à bilames*.

Une bilame est fabriquée en soudant l'une sur l'autre deux lames de métaux qui diffèrent par leur coefficient de dilatation. L'une de ces lames sera par exemple du métal invar[1], alliage de fer et de nickel dont le coefficient de dilatation est très faible; l'autre, un ferro-nickel dont le coefficient de dilatation est quinze fois celui de l'invar.

A une température déterminée, la bilame est plane. A une température plus élevée, elle se courbe en arc de cercle, l'invar du côté concave. La bilame se dilate en effet plus sur une face que sur l'autre et, quand elle se courbe, la face concave est plus courte que la face convexe.

1. L'invar contient 64 % de fer et 36 % de nickel. Son coefficient de dilatation est 8.10^{-7}; il est quinze fois plus petit que celui du fer.

Dans les appareils électriques, la bilame découpée en V, fixée entre deux bornes (fig. 6), est traversée par le courant et s'échauffe par effet Joule. L'extrémité A se déplace et peut ouvrir ou fermer un circuit.

Description d'un petit disjoncteur à bilame.

Il s'agit d'un appareil construit pour 5, 10 ou 25 ampères suivant le modèle.

Un interrupteur I, qui connecte les extrémités d'un fil de ligne (fig. 7), est main-

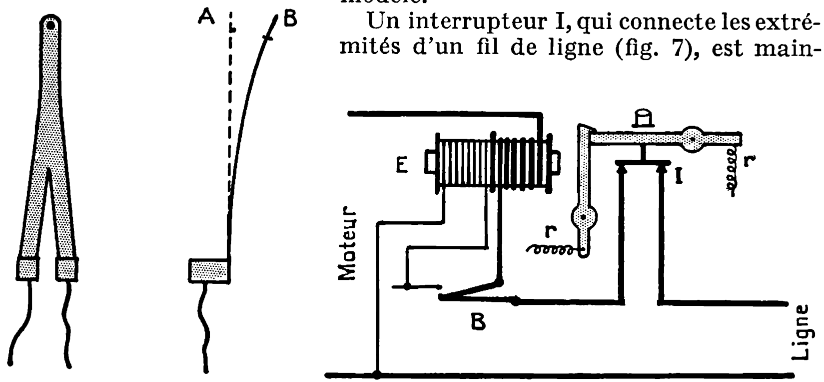


Fig. 6. — La ***bilame*** chauffée par le courant, se courbe de la position A à la position B.

Fig. 7. — Principe d'un ***disjoncteur magnétique et thermique.*** Un dispositif semblable est monté sur chaque fil de ligne.

tenu en position de fermeture, malgré un ressort *r* qui rend à l'ouvrir, par un crochet en fer doux constituant l'armature mobile de l'électro-aimant E. Cet électro porte deux bobines : l'une à gros fil est en série avec l'interrupteur I; l'autre à fil fin, de grande résistance, peut supporter la tension existant entre les fils de ligne. Le courant traverse la bilame B. La bilame, quand elle est fortement chauffée, ferme le circuit de la bobine à fil fin et la met en dérivation sur les deux fils de ligne.

Un dispositif identique est placé sur le second fil de ligne et les deux interrupteurs sont enclenchés par le même bouton.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant :

1° Quant un court-circuit se produit dans l'installation et que le courant atteint plusieurs fois l'intensité normale, la bobine à gros fil aimante fortement l'électro qui attire son armature et le courant est coupé. La durée du court-circuit a été très brève, moins d'un dixième de seconde.

2° Si l'intensité se fixe à 1,3 fois l'intensité normale ou à une valeur plus élevée, mais insuffisante pour provoquer le déclenchement du disjoncteur par la bobine à gros fil, la bilame s'échauffe lentement. Au bout

de 25 secondes par exemple, la bilame ferme le circuit de la bobine à fil fin; cette bobine ajoute son action à celle de la bobine à gros fil et le déclenchement se produit.

Ce déclenchement est aussi déterminé par l'action d'un bouton spécial et l'appareil sert à la fois de disjoncteur et d'interrupteur.

5. On commande et on protège les moteurs électriques par des contacteurs-disjoncteurs.

Étudions un contacteur-disjoncteur pour moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit (fig. 8).

Le schéma en est donné par

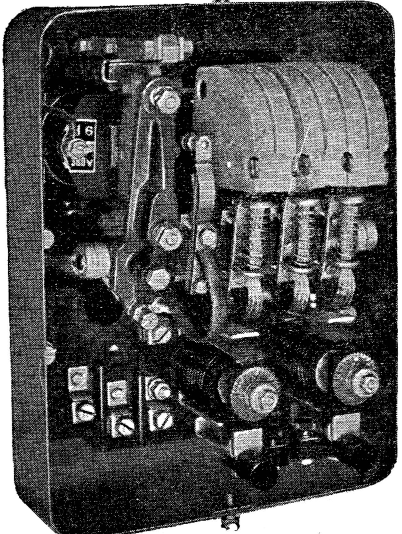


Fig. 8. — ***Contacteur-disjoncteur*** pour moteur à rotor en court-circuit. (Cliché de la Société « *la Télémécanique* »).

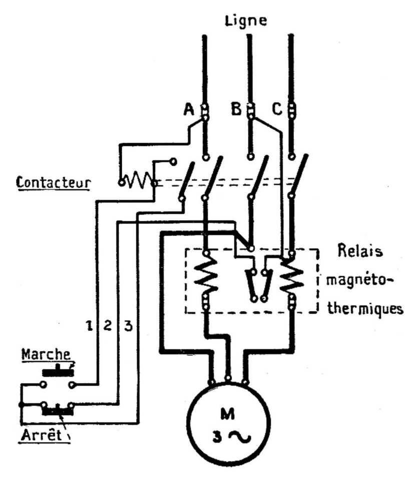


Fig. 9. — Schéma des connexions d'un contacteur-disjoncteur pour moteur à rotor en court-circuit.

la figure 9. L'appareil comprend un *contacteur* et deux *relais magnéto-thermiques*.

Le contacteur se compose d'un interrupteur tripolaire fait de trois balais montés sur un axe isolé et d'une bobine à fil fin dont le noyau feuilleté attire, quand elle est excitée, une armature feuilletée qui fait tourner l'axe porte-balais pour appliquer les balais sur les plots d'arrivée de la ligne.

L'interrupteur ne reste fermé que si un courant traverse la bobine. Quand ce courant est coupé, l'interrupteur s'ouvre brusquement sous l'action d'un ressort de rappel.

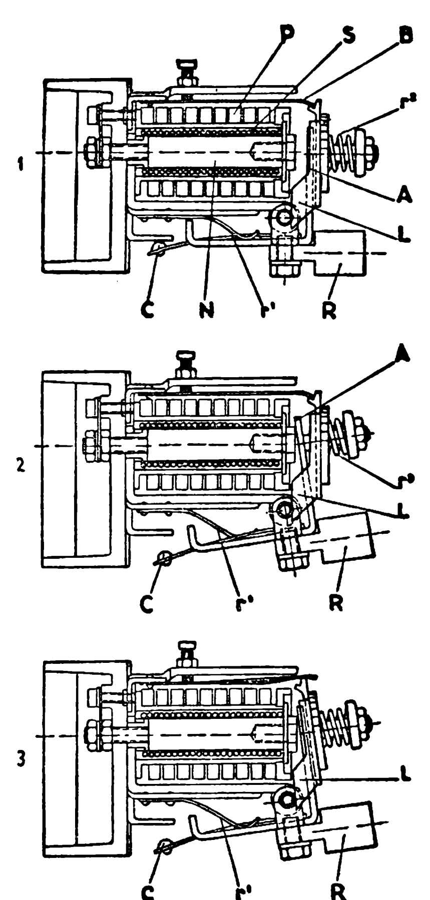


Fig. 10. — Coupe d'un *relais magnéto-thermique*.

A. Palette magnétique.
B. Bilame.
C. Contact.
L. Levier de déclenchement.
N. Noyau.
P. Bobine primaire.
S. Bobine secondaire.
R. Bouton de réarmement,
r_1 et r_2. Ressorts.

(Cliché de « *la Télémécanique* ».)

Le schéma montre que la bobine est branchée entre les phases A et B de la ligne triphasée. Une boîte à deux boutons-poussoirs est intercalée dans le circuit. Le bouton marqué « Marche » est ouvert dans sa position de repos. En appuyant sur ce bouton, on ferme le circuit de la bobine : l'interrupteur enclenche. Il reste fermé quand le bouton revient à sa position initiale d'ouverture grâce à un quatrième balai de petite taille qui ferme le circuit de la bobine par les fils 3 et 2.

En appuyant sur le bouton « Arrêt », on coupe le circuit de la bobine et le déclenchement du contacteur se produit.

Le groupe de deux relais magnéto-thermiques est monté sur les fils A et C.

Un relais comporte une bobine P à gros fils parcourue par le courant d'une phase. Devant le noyau de cette bobine est placée une palette de fer doux A portant un contact C. La palette est appliquée par le ressort r^2 contre une plaque qui bute contre une bilame B (fig. 10-1).

Quand un court-circuit se produit, la palette A est fortement attirée. Malgré le ressort r^2, elle se déplace vers le noyau et le courant en C est coupé : l'appareil a fonctionné comme un disjoncteur magnétique (fig. 10-2).

Un second enroulement S à une seule couche est placé sur le noyau sous la bobine à gros fil. Le noyau constitue ainsi le circuit magnétique d'un transformateur dont la bobine à gros fil est le primaire et l'enroulement supplémentaire le secondaire. Ce secondaire débite sur

la bilame qui est ainsi chauffée par un courant proportionnel à celui qu'absorbe le moteur.

Dans le cas d'une faible surcharge prolongée, la bilame se dilate, se courbe et libère la plaque supportant la palette. La palette obéit alors à l'attraction du noyau et le contact en C est coupé (fig. 10-3) : l'appareil a fonctionné comme un disjoncteur thermique.

Le contact C (fig. 9) est intercalé dans le circuit de la bobine à fil fin du contacteur. Quand ce circuit est coupé, le contacteur s'ouvre.

En appuyant sur le bouton R lorsque la bilame s'est refroidie, on place à nouveau l'appareil en position de fonctionnement : on dit qu'on le « réarme ».

Un contacteur-disjoncteur assure donc trois modes de protection en coupant le courant du moteur :

1° quand la tension entre phases s'affaiblit beaucoup ou s'annule ;

2° quand il se produit un court-circuit;

3° dans le cas d'une surcharge relativement faible, mais d'une durée plus ou moins longue.

On utilise de plus en plus ces appareils dans les ateliers de construction mécanique, surtout pour la commande individuelle des tours. La boîte à boutons est montée sur le traînard, à portée de la main de l'ouvrier.

Exercices.

1. Dessiner le tableau de distribution du poste de transformation de la figure 2 de la 32e leçon après avoir relu le paragraphe 3 correspondant.

2. Dessiner le schéma d'un contacteur-disjoncteur pour moteur triphasé à rotor en court-circuit d'après la figure 9, mais avec trois boîtes à boutons commandant la marche et l'arrêt du moteur de trois endroits différents.

3. Établir le schéma d'un tableau pour un alternateur triphasé en étoile de 150 *kVA*, 200 — 115 *V*, avec excitatrice en dérivation de 120 *V*, 15 *A*.

L'alternateur devra pouvoir être couplé en parallèle avec une autre source, le couplage ayant lieu à l'extinction avec des lampes et un voltmètre de zéro.

Prévoir 4 départs, dont 2 de 150 *A* à trois fils pour la force motrice et 2 de 50 *A* pour l'éclairage. Toutes les lignes seront raccordées à la partie inférieure du tableau. Le neutre ne sera pas mis à la terre, prévoir le dispositif prévu par l'article 37 du décret du 4 août 1935 pour vérifier journellement qu'il n'existe pas d'écart anormal de tension entre chaque pôle ou phase et la terre; les appareils servant à ce contrôle ne doivent être branchés que le temps strictement nécessaire à l'opération.

Brevet professionnel. Nancy.

7. Problèmes.

A. Révision du cours de Ire T. I.

1. L'entrefer d'un électro-aimant est limité par un carré ABCD de 10 cm de côté; cet électro-aimant crée un champ magnétique uniforme, horizontal, d'induction 10 000 gauss. On admet que le champ n'existe qu'à l'intérieur de la surface ABCD (fig. 1).

Un cadre carré MNPQ a 10 cm de côté, sa résistance est de 5 milliohms. On déplace ce cadre verticalement à la vitesse constante de 20 *cm/s* de façon que MQ et NP restent parallèles à AD et BC.

a) Étudier le sens et calculer l'intensité du courant dans le cadre à partir de l'instant où QP est confondu avec AB jusqu'à ce que le cadre soit sorti du champ.

b) Calculer la force qui s'oppose au mouvement.

c) Quelle est l'énergie dissipée en chaleur dans le cadre pendant le mouvement.

d) Quel est le travail accompli par les forces électromagnétiques.

Fig. 1.

2. Une tige conductrice CC′ peut glisser sans frottement sur deux rails conducteurs parallèles AB et A′B′ situés dans un plan horizontal à la distance $l = 40$ cm l'un de l'autre (fig. 2). L'ensemble est placé dans un champ magnétique vertical uniforme dirigé de bas en haut et d'intensité H = 8 000 Oe (perméabilité de l'air : $\mu_0 = 1$ U. E. M. C. G. S.).

A l'aide d'un interrupteur double, on peut relier les deux bornes d'entrée A et A′ soit à une résistance R = 4 Ω (interrupteur dans la position 1), soit à un accumulateur de f. e. m. E = 2,1V et de résistance intérieure $r = 0{,}1$ Ω, la borne positive étant alors reliée au point A′ (interrupteur dans la position 2).

Dans tout le problème, on supposera que les rails sont très longs et que leur résistance peut être négligée, l'énoncé de ce problème ne réalisant que des conditions simples mais

théoriques. La résistance par unité de longueur du conducteur CC′ est de 0,02 Ω/*cm*. Les résistances de contact et l'inductance du circuit sont négligées.

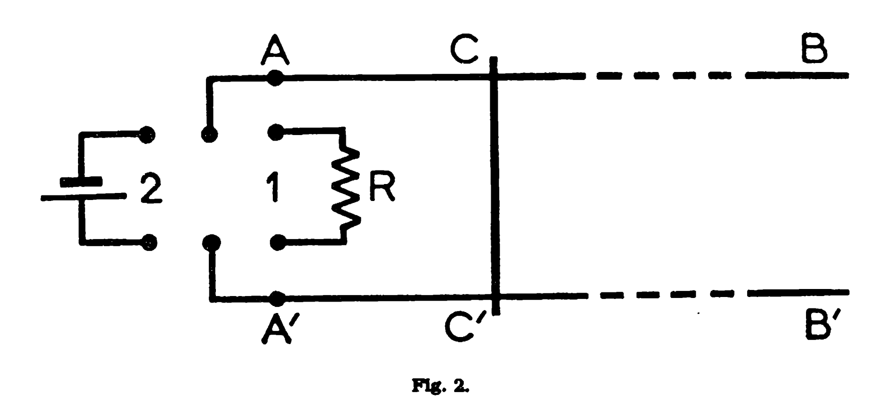


Fig. 2.

1° L'interrupteur étant dans la position 1, on déplace le conducteur CC′ de gauche à droite, à une vitesse uniforme $v = 0{,}6\ m/s$, on demande :

a) La force électromotrice induite dans le conducteur CC′;

b) Le courant qui traverse CC′ et son sens;

c) La force électromagnétique qui s'oppose au déplacement du conducteur;

d) La puissance mécanique dépensée contre les forces électromagnétiques lors de ce déplacement.

2° Le conducteur CC′ étant supposé au repos, on ferme l'interrupteur dans la position 2.

a) Déterminer la force électromagnétique qui s'exerce alors sur le conducteur CC′. Quel est son sens?

b) Quelle vitesse atteindra-t-il si, ensuite, on le laisse se déplacer librement?

3° L'interrupteur étant toujours dans la position 2, on entraîne le conducteur CC′. dans le sens de la force électromagnétique à une vitesse que l'on fait croître théoriquement de zéro jusqu'à une valeur très grande qu'il est permis de considérer comme infinie.

a) Déterminer l'expression de la puissance mécanique fournie P_m en fonction de la vitesse v;

b) Représenter la courbe $P_m = f(v)$.

Interpréter les différentes zones de fonctionnement.

(*Entrée E. N. I. A. M.* 1952)

3. L'installation électrique d'un atelier alimenté en courants triphasés 220V — 50Hz comprend 12 lampes 150W — 220V et 2 moteurs asynchrones triphasés ayant les caractéristiques suivantes :

	PUISSANCE UTILE	VITESSE	RENDEMENT	COS φ	TENSION
1er moteur	5 *ch*	1415 *tr/mn*	0,85	0,85	220 V 380 V
2e moteur	3 *ch*	915 *tr/mn*	0,81	0,83	127 V 220 V

Les trois phases sont équilibrées.

1° Faire un schéma simplifié de l'installation.

2° Calculer l'intensité du courant dans la ligne d'alimentation :
a) lorsque le 1er moteur fonctionne seul;
b) lorsque le 2e moteur fonctionne seul;
c) lorsque l'éclairage fonctionne seul.

3° Déterminer l'intensité dans la ligne d'alimentation et le facteur de puissance de l'installation, lorsque les moteurs et l'éclairage fonctionnent simultanément :
a) graphiquement;
b) par application du théorème de Boucherot.

B. Cours de T. I.

4. Le circuit magnétique, représenté par la figure 3, est réalisé en acier doux coulé. Il a une épaisseur de 50 mm.

Les bobines magnétisantes sont placées sur les culasses C_1 et C_2, elles comprennent chacune 600 spires. On veut réaliser un flux magnétique de 400 000 maxwells dans le noyau N; en admettant que les flux de fuites qui se ferment par l'air sans passer par le noyau sont le dixième du flux dans les culasses; calculer l'intensité du courant magnétisant. (Courbe d'aimantation de l'acier coulé page 8).

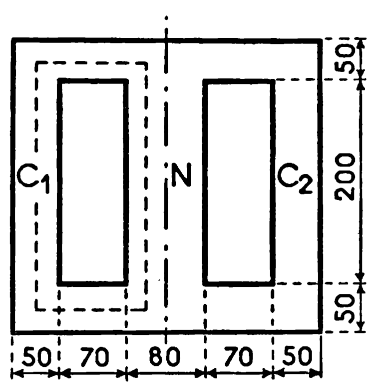


Fig. 3.

5. Un tore de fer doux, à section circulaire, a un diamètre intérieur de 25 cm et un diamètre extérieur de 40 cm. Ce tore porte un premier enroulement d'extrémité A et B, régulièrement réparti, comportant $N_1 = 140$ spires. La perméabilité μ du fer doux est supposée constante et de valeur 1 050 C. G. S.

On applique aux bornes A et B une tension continue de 2V, le courant absorbé est 4A; on demande :

a) la résistance de cet enroulement;

b) **le champ magnétique et l'induction en un point du noyau, l'aimantation étant** supposée uniforme;

c) l'inductance de cet enroulement. Quelle serait la nouvelle **valeur de l'inductance** si l'on doublait le nombre des spires de l'enroulement?

d) On dispose sur le tore un deuxième enroulement portant $N_2 = 50$ spires, dont les bornes C et D sont fermées sur une résistance; déterminer la quantité d'électricité induite dans cet enroulement quand on coupe le courant d'alimentation du premier enroulement. La résistance totale du second circuit est de 16 Ω.

(*E. N. I. A. M.* **1951 partiel**).

6. Une dynamo shunt, dont l'induit a pour résistance 0,5 ohm et l'inducteur 80 ohms, alimente sous 120 volts un circuit comprenant en dérivation :

1° un groupe de 12 lampes portant chacune sur le culot les indications suivantes : 50 W, 120 V;

2° un ensemble comprenant un voltamètre à sulfate de cuivre et à électrodes en cuivre monté en série avec un rhéostat. La résistance totale de cette branche est 40 ohms. Sur une des électrodes, il s'est déposé 0,945 gramme de cuivre en 16 minutes et 6 secondes;

3° un moteur dont la force contre-électromotrice est 110 volts et la résistance 1 ohm:

On demande :

1° l'intensité du courant dans chaque partie du circuit;

2° la force électromotrice de la dynamo.

7. Un moteur à courant continu commande une pompe centrifuge qui élève 10 litres d'eau par seconde à 15,5 mètres de hauteur. Le moteur, dont le rendement industriel est 0,82, absorbe au total 28,5 A sous 110 volts. Calculer :

1° le rendement global du groupe moto-pompe;

2° la puissance mécanique fournie par le moteur à la pompe;

3° le rendement de la pompe.

8. Une dynamo, à excitation indépendante, tournant à 1 950 *tr/mn*, a donné à vide

Courant d'excitation :	F. é. m. :
$i = 0$ ampère	E = 2,51 volts.
= 0,27	= 71
= 0,40	= 98
= 0,44	= 105
= 0,53	= 117
= 0,64	= 128
= 0,90	= 147

En charge, avec une excitation constante de 0,63 ampère, à 1 950 *tr/mn*, elle a donné

Courant débité :	Tension aux bornes :
I = 0 ampères	U = 127 volts
= 7,5	= 122
= 15,3	= 116
= 20,4	= 103
= 21,6	= 107

La résistance des inducteurs est 150 ohms.

On demande :

1° de tracer les caractéristiques à vide et en charge et la courbe de réaction d'induit;

2° de déterminer la résistance à ajouter aux inducteurs pour que la machine donne en génératrice shunt 110 volts et 17 ampères à 1950 *tr/mn*.

9. **Une dynamo à excitation indépendante a donné, à vide, à la vitesse constante de** 1 400 *tr/mn* :

i = 0,81 ampères	90 volts.
0,96 —	99 —
1,11 —	108 —
1,23 —	115 —
1,50 —	128 —
1,74 —	137 —
2,13 —	149 —

Tracer la caractéristique à vide de la machine.

Les inducteurs sont ensuite montés en dérivation, sans **rhéostat de** champ, **aux** bornes de l'induit. La dynamo, à 1 400 *tr/mn*, à vide, produit une f. é. m. de 130 volts.

Quelle est la résistance des inducteurs?

A ces inducteurs on ajoute un rhéostat de champ dont la résistance r varie entre 0 et 20 ohms. **Tracer en fonction de r la courbe de la f. é. m. que la machine donne à 1 400** ***tr/mn.***

10. Une dynamo à excitation indépendante constante donne, à vide, 110 V à 2 400 *tr/mn*. La résistance de l'induit est 0,2 Ω.

Sur l'arbre de la machine est calée une poulie de 0,35 *m* **de diamètre sur** laquelle est enroulée une corde tirée par un poids de 15 kg.

On ferme l'induit de la machine sur un circuit dont la **résistance est 10 Ω**. On laisse prendre à la dynamo une vitesse constante.

Calculer cette vitesse en négligeant les **frottements, l'hystérésis, les courants de Foucault**, la réaction d'induit.

Quelle est alors la f. é. m. de la machine?

11. E. N. P. Lyon. — Une dynamo shunt donne **400 volts aux bornes et 120 ampères** à pleine charge. **Elle tourne à 450** ***tr/mn.***

On a mesuré :

la résistance de l'induit : R = 0,88 Ω.

la résistance de l'inducteur : r = 82 Ω.

La réaction d'induit à pleine charge est 20 V.

Les pertes par hystérésis, courants de Foucault et frottements sont de 3 250 W.

On demande :

1° la f. é. m. de la dynamo;

2° le rendement de la dynamo;

3° le couple du moteur qui entraîne la dynamo.

4° La dynamo alimente, par une ligne bifilaire en cuivre de 60 ***mm²*** **de section, une usine de tissage à 160** ***m*** **de la génératrice. De quelle puissance disposera-t-on à cette usine?**

12. **Tracer les caractéristiques à vide et en charge d'une dynamo qui a fourni aux** essais :

a) **à vide, à excitation indépendante et vitesse constante**

Intensité d'excitation :	F. é. m. :
= 0,5 ampère	E = 93 volts.
0,7 —	116 —
1 —	139 —
1,5 —	163 —
1,75 —	170 —
1,9 —	173 —

b) en charge, à la même vitesse, excitée en dérivation sans rhéostat de champ :

Intensité débitée :	Tension aux bornes :
I = 0 ampère	U = 130 volts.
10 —	126 —
15 —	122 —
20 —	116 —
25 —	106 —
30 —	90 —

Déterminer le nombre de spires de l'enroulement série qu'il faut placer sur chaque pôle de la dynamo pour qu'elle fournisse 130 volts, en débitant 30 ampères, comme elle les fournit à vide.

Le nombre des spires de l'enroulement en dérivation est de 1 200 par pôle.

13. La résistance d'induit d'une dynamo compound est 0,4 Ω; celle des inducteurs série, 0,01 Ω et celle des inducteurs en dérivation 43 Ω.

La dynamo débite 35 A et la tension à ses bornes est 110 volts.

Chercher :

1° le courant dans les électros,

2° le courant dans l'induit,

3° la f. é. m. de la machine,

4° le rendement sachant que les pertes mécaniques et magnétiques sont 250 watts.

14. E. N. P. Lyon. — On désire construire une dynamo fournissant une f. é. m. de 192 V et une intensité de 40 A. La vitesse périphérique est prise voisine de 15 mètres par seconde pour une vitesse de 1 500 *tr/mn*. La fréquence admise dans les tôles est de 25. La largeur de l'induit sera les 6/10 du diamètre; l'induction dans l'entrefer 8 000 gauss; l'arc polaire utile est les 7/10 de l'arc polaire géométrique. Le nombre d'ampères-conducteurs par centimètre de périphérie de l'induit doit être inférieur à 150 pour une bonne commutation.

On demande :

1° le diamètre et la largeur de l'induit;

2° le nombre de pôles inducteurs, le schéma de l'inducteur montrant la répartition des lignes de force;

3° le groupement schématique des générateurs polaires de l'induit, l'intensité dans un conducteur de l'induit;

4° la surface d'un pôle, le flux sous un pôle et le nombre de conducteurs de l'induit. Vérifier que le nombre d'ampères-conducteurs par centimètre satisfait à la condition indiquée. Que faudrait-il faire s'il n'était pas ainsi?

15. Un moteur shunt, alimenté sous une tension constante U = 100 V, tourne à vide à la vitesse de 1 500 *tr/mn* en absorbant un courant de 2,5 A. Le rhéostat de champ est alors hors circuit. Sachant qu'en marche normale le courant dans l'induit est 50 ampères, calculer la valeur à donner à la résistance du rhéostat de champ, de façon que la vitesse reste égale à 1 500 *tr/mn*.

La résistance de l'induit est 0,5 Ω, la résistance des inducteurs est 40 Ω et l'on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé.

16. **Un moteur série est alimenté à la tension de 550 V. Sa puissance est 50 *ch*, son rendement 0,80. Les pertes par effet Joule dans le moteur sont égales au total des autres pertes**
Calculer :
1° l'intensité absorbée par le moteur;
2° la résistance de l'ensemble induit-inducteurs;
3° la f. c. é. m.;
4° la vitesse avec laquelle ce moteur actionnant un treuil dont le rendement est 0,75 soulèvera une charge de 5 000 kg.

17. E. N. P. St-Etienne. — Un moteur shunt bipolaire possède les caractéristiques suivantes : Nombre de conducteurs de l'induit : 600;
Flux sous un pôle : 500 000 maxwells;
Résistance de l'induit entre balais : 0,2 ohm;
Résistance des inducteurs : 120 ohms.
Sous tension de 120 volts, il absorbe 16 ampères.
On demande de calculer, en négligeant la réaction d'induit :
1° la f. c. é. m. du moteur;
2° sa vitesse de rotation;
3° son couple;
4° sa puissance;
5° sa vitesse de rotation quand la charge est doublée.

18. Un moteur excité en dérivation est alimenté sous la tension $U = 115$ V. Le courant d'excitation est 0,25 A et, à vide, l'intensité du courant dans l'induit est 2,5 A. La résistance de l'induit entre balais est 0,5 Ω.
Trouver :
1° la résistance du circuit inducteur;
2° la f. c. é. m. du moteur;
3° la puissance totale absorbée par le moteur tournant à vide.

19. E. N. P. Lyon. — Un moteur série actionne un treuil capable d'élever une masse de 2 tonnes à 6 *m* de hauteur en 1 minute. Le rendement du treuil est 0,75.
Le rendement du moteur est 0,80. On suppose que les pertes par effet Joule dans l'induit sont égales aux pertes par effet Joule dans l'inducteur et que le total de ces pertes par effet Joule est égal aux autres pertes.
La tension d'alimentation est 200 V.
On demande :
1° le courant absorbé par le moteur;
2° la résistance de l'induit et celle de l'inducteur;
3° la résistance du rhéostat de démarrage pour qu'au démarrage l'intensité absorbée ne dépasse pas 20 A;
4° la longueur et la section du fil utilisé pour ce rhéostat sachant que la densité de courant admise est de 4 A par mm^2 et que la résistivité du fil est 30 microhms-centimètres.

20. Une installation à courant continu est alimentée par une ligne à trois fils. La résistance de chacun des deux fils principaux est 0,11 Ω, celle du fil d'équilibre, 0,22 Ω.
Au départ de la ligne, on maintient des tensions constantes de + 110 V et — 110 V entre le fil d'équilibre et chacun des fils principaux, soit 220 V entre ces derniers.
A l'extrémité de la ligne sont connectées sur l'un des ponts une résistance de 15 Ω sur l'autre pont une résistance de 20 Ω.
1° Quelles sont les intensités des courants dans chacun des fils?
2° Quelles sont les tensions aux bornes des résistances?
3° Que deviennent ces tensions quand le fil d'équilibre est coupé?

21. ENP. Metz. — **Un transformateur triphasé à prises multiples** comporte par colonne 1 080 spires au primaire et 30 spires au secondaire. Alimenté sur la dernière prise par un réseau à 50 p/s, il donne 503 volts.

1° Quelle est la tension d'alimentation du primaire en supposant les différents montages : étoile-étoile, triangle-étoile; étoile-triangle?

2° Le transformateur est effectivement monté étoile-étoile : nombre des spires des bobines spéciales pour les prises ± 5 %?

3° La longueur moyenne d'une spire basse tension est 114 cm, la spire est en cuivre de 20×7. Quelle est, à 75°, la résistance par colonne du circuit basse tension?

4° Les pertes dans le cuivre basse tension sont 1 050 watts à pleine charge. Quelle est la densité de courant admise dans l'enroulement?

4° Les pertes dans le cuivre haute tension sont de 1 580 watts à pleine charge et les pertes magnétiques de 2 520 watts. Quel est le rendement du transformateur dans les cas suivants :

a) à pleine charge, $\cos \varphi = 1$

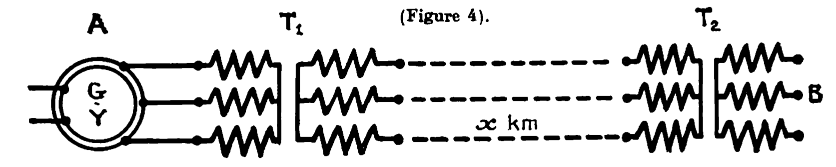
b) à 1/4 de charge, $\cos \varphi = 0{,}50$?

22. ENP. Vierzon. — Un alternateur triphasé A (fig. 4), dont les enroulements sont associés en étoile, donne par phase et à vide, une *f. é. m.* efficace de 1 470 V de fréquence $f = 50$ p/s lorsque son inducteur tourne à la vitesse de 500 tr/mn.

L'enroulement statorique comporte deux encoches par pôle et par phase et 12 conducteurs par encoche. Le flux utile, sortant d'un pôle inducteur, est : $\Phi = 4{,}5\ 10^6$ maxwells.

A pleine charge, cet alternateur peut débiter une intensité de 800 A. Pour ce débit, lorsque le facteur de puissance est 0,80, la chute de tension interne est égale à 15 % de la tension à vide.

Pour transporter en B l'énergie fournie par A, on installe au départ et à l'arrivée deux transformateurs étoile-étoile T_1 et T_2.



(Figure 4).

T_1, dont le rapport de transformation est $k_1 = 8{,}4$, a un rendement égal à 0,98 à pleine charge lorsque son $\cos \varphi$ primaire est 0,80; son $\cos \varphi$ secondaire est alors 0,82. Le rendement de T_2 est 0,978 lorsque le $\cos \varphi$ primaire est 0,82; le $\cos \varphi$ secondaire correspondant est alors 0,85; le rapport de transformation de T_2 est $k_2 = \frac{2}{13}$.

Le rendement global de ce transport d'énergie, rapport de la puissance réelle reçue en B à la puissance réelle fournie par l'alternateur A est $\eta = 0{,}90$.

Les transformateurs sont réunis par des câbles en cuivre de 14,1 mm² de section, dont la résistance est de 1,283 Ω au kilomètre.

Calculer :

1° le nombre de pôles $2p$ de l'inducteur de l'alternateur, le nombre n de

conducteurs induits par phase, le coefficient de Kapp *k*, la tension efficace entre phases à pleine charge;

2° la puissance réelle P_1 fournie par l'alternateur;

3° la tension secondaire entre phases à la sortie de T_1 et la puissance réelle correspondante P_2;

4° l'intensité efficace du courant dans chaque fil de ligne;

5° le rendement propre de la ligne et la puissance réelle perdue en ligne;

6° la chute de tension en ligne par phase et la longueur *x* de la ligne;

7° la puissance réelle P_3 et la tension entre phases à la sortie de T_2.

23. ENP. Creil. — I. Figurer la courbe des variations du couple d'un moteur asynchrone d'après les valeurs suivantes :

vitesse en *tr/mn* :	0	400	800	1 175	1 250	1 350	1 400	1 450	1 500
couple en *m.kg* :	18	21	28,5	37	34,5	27	22	15	0

Déduire de cette courbe :

1° La valeur du couple normal, le glissement en pleine charge étant 3,33 %;

2° la puissance mécanique en chevaux dans ces conditions;

3° le couple correspondant au calage et la puissance demandée au moteur dans ce cas.

II. Le rendement du moteur est 0,88 et son facteur de puissance 0,80. Quelles sont pour une puissance mécanique de 30 *ch* :

1° l'intensité en ligne pour un stator triphasé alimenté sous une tension entre phases de 200 V?

2° l'intensité dans les enroulements du stator couplés en triangle?

3° la puissance indiquée par chacun des deux wattmètres montés pour la mesure de la puissance absorbée?

4° l'intensité absorbée par un stator monophasé fonctionnant dans les mêmes conditions et sous la même tension?

5° dans ce dernier cas, la capacité de la batterie de condensateur à mettre en parallèle avec le moteur pour ramener à l'unité le facteur de puissance? Que devient alors l'intensité absorbée?

24. ENP. Armentières. — Un moteur asynchrone triphasé est alimenté sous 220 V entre phases. Il absorbe une puissance de 10,5 *ch* et son rendement est 0,85. La poulie du moteur a un diamètre de 200 mm. Le nombre de paires de pôles du stator est $p = 2$, le glissement $g = 0{,}04$ et la fréquence est 50 p/s.

1° Calculer, en kgf, la force tangentielle à la poulie qui tend à entraîner la courroie.

2° Pour effectuer l'essai du moteur, on utilise un frein de Prony parfaitement équilibré, dont la longueur du bras de levier supportant le plateau où l'on met les poids est de 1 m. Calculer le poids P qu'il faut placer dans le plateau pour rétablir l'équilibre lorsque la puissance absorbée par le moteur est celle indiquée ci-dessus.

3° En admettant que toute l'énergie mécanique est transformée en chaleur et qu'elle est intégralement transmise à l'eau de refroidissement du frein, calculer la quantité d'eau dont il faut disposer, sachant que la température de l'eau à l'entrée est de 4° et que la température de cette eau prise à la sortie est de 80°. L'essai doit durer 1 heure.

25. **ENP. *Voiron*.** — Un alternateur monophasé (12 pôles, 420 tours par minute, 220 volts) alimente les récepteurs suivants montés en parallèle :

1° un appareil dont la résistance est 2,8 ohms et le coefficient de self-induction 0,02 henry;

2° un moteur asynchrone de 20 *ch* utiles, le rendement à pleine charge est 0,90, le facteur de puissance 0,82;

3° un groupe de petits moteurs asynchrones consommant ensemble

courant watté : 80 A;
courant déwatté : 40 Ar.

On demande :

a) le courant et le facteur de puissance de l'alternateur;

b) la puissance active et la puissance réactive fournies;

c) la dépense pour 8 heures de marche :

prix du kWh : 8 fr.
prix du kVArh : 2 fr.

d) le couple et la vitesse du moteur asynchrone de 20 *ch*; le stator est bobiné à 6 pôles, le glissement à pleine charge est de 3,5 %;

e) la capacité d'une batterie de condensateurs destinée à ramener le facteur de puissance à l'unité.

26. **ENP. *Tarbes*.** — Un transformateur triphasé triangle-étoile reçoit de l'énergie d'une ligne à 10 000 V. Chaque bobine HT comporte 4 000 spires. Le rendement est 97 % et la chute de tension 2 %.

Ce transformateur alimente une installation comprenant :

1° 120 lampes de 75 W, 125 V (phases toujours équilibrées);

2° 40 moteurs asynchrones triphasés de puissance moyenne 2 *ch*, 220 V, rendement 0,85, cos φ à pleine charge 0,75.

Faire le schéma de montage du transformateur, d'un moteur et de quelques lampes.

Calculer :

1° le nombre de spires de chaque bobine du secondaire;

2° l'intensité absorbée par phase par les lampes et celle absorbée par les moteurs;

3° l'intensité totale par fil de ligne;

4° la puissance réactive et le cos φ du secondaire;

5° l'intensité par fil du primaire, le facteur de puissance du primaire étant égal à celui du secondaire.

27. **ENP. *Lyon*.** — Une installation est alimentée en courants triphasés, 220 V entre phases, $f = 50$ p/s. Elle utilise les récepteurs suivants :

1° 10 moteurs asynchrones 5 *ch*, 8 pôles, glissement 0,05, rendement 0,80, cos $\varphi = 0,80$ AR;

2° un moteur synchrone 25 *ch*, rendement 0,85, cos $\varphi = 1$;

3° 120 lampes de 40 W chacune, montées en étoile.

On demande :

1° la tension de fonctionnement et la résistance à chaud d'une lampe;

2° la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone et le couple correspondant;

3° l'intensité absorbée par chaque groupe de récepteurs et l'intensite totale.

4° Le déphasage du moteur synchrone pour que le courant total soit en phase avec la tension étoilée, la puissance active restant la même;

5° en admettant que l'intensité en ligne est 210 A pour $\cos \varphi = 1$, que la résistance de la ligne est 0,05 Ω par phase et la réactance par phase 0,1 Ω, quelle est la tension au départ si la tension à l'arrivée est 220 V?

28. ***BNP. Vierzon.*** — Un atelier est alimenté en énergie électrique par une distribution triphasée 3 fils (fig. 5).

On se propose de vérifier l'exactitude des constantes k_1 du compteur C_1 d'énergie active et k' du compteur C_2 d'énergie réactive. A cet effet, on dispose des appareils étalons (ampèremètre A, voltmètre V, wattmètres W_1 et W_2) conformément au schéma et on fait tourner les moteurs électriques M_1, M_2..., M_n qui entraînent les machines-outils de l'atelier.

Lorsque le régime de fonctionnement est stable, on relève les indications

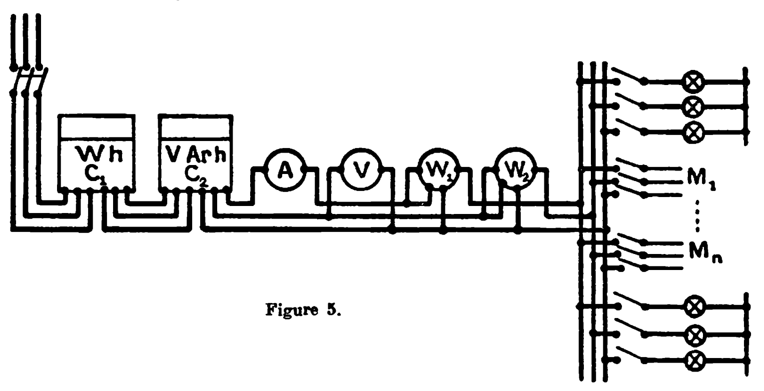


Figure 5.

des appareils de mesure et on compte les nombres de tours effectués par les disques des compteurs pendant des temps déterminés.

Les résultats de ces observations sont consignés ci-après :
ampèremètre A : I = 180 A; voltmètre V : U = 220 V; wattmètre W : $P_1 = 35{,}1$ kW; $W_2 : P_2 = 16{,}6$ kW;
le disque du compteur C_1 fait 25 tours en 42 secondes 2/5,
le disque du compteur C_2 fait 30 tours en 85 secondes 3/5.

On demande de calculer :

1° la puissance réelle P absorbée par l'installation,

2° le facteur de puissance $\cos \varphi$ en utilisant :

a) les valeurs données par l'ampèremètre, le voltmètre et les wattmètres;

b) la puissance réactive P' absorbée par l'installation;

3° la puissance réactive P_2 absorbée par l'installation;

4° les constantes k_1 et k_2 des compteurs (la constante est l'énergie active ou réactive correspondant à un tour du disque).

On suppose que cet essai a montré que les compteurs étaient parfaitement étalonnés.

Pendant une journée, pour un fonctionnement continu de 6 heures des machines-outils de l'atelier, les consommations d'énergie ont été :
énergie active : W = 525 kWh; énergie réactive : W = 476,1 kWArh.

Lorsque les machines-outils fonctionnant au même régime que précédemment, l'éclairage de l'atelier est assuré par des lampes à incandescence de puissance unitaire 500 W, les consommations d'énergie ont été, pour une durée de 2 heures : énergie active : $W' = 229$ kWh; énergie réactive : $W'_1 = 158{,}7$ kVArh.

Calculer dans chaque cas :

5° les valeurs moyennes des puissances active et réactive.

6° les valeurs moyennes de l'intensité et du facteur de puissance.

Déduire de ces résultats le nombre de lampes de l'installation.

Quelle est la tension d'alimentation des lampes? Pourquoi?

29. BNP. Tarbes. — Une installation de pompage se compose d'une pompe centrifuge, dont le rendement est 0,75, élevant 150 litres d'eau par seconde à 15 mètres de hauteur.

Cette pompe est entraînée par un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné fonctionnant sous 220 volts.

Le courant est fourni par une ligne à 22 000 volts. Un transformateur étoile-étoile abaisse la tension. Le neutre du secondaire est accessible.

La salle de la pompe est éclairée par une lampe à incandescence fonctionnant sous la tension usuelle de ces appareils.

1° Donner un schéma de cette installation, en indiquant tous les appareils de manœuvre, de protection et de mesure qui sont utiles.

2° *a*) Quelle doit être la puissance utile du moteur?

b) Quelle est la puissance qu'il absorbe si son rendement à pleine charge est 0,80?

c) Y a-t-il avantage ou inconvénient à se servir d'un moteur plus puissant qu'il n'est juste nécessaire?

3° Le $\cos\varphi$ à pleine charge du moteur étant 0,85, quelle est l'intensité absorbée sous la tension de 220 volts?

Combien marqueront, au bout de 100 heures, les compteurs d'énergie active et réactive dont l'installation est munie? (Ne pas représenter ces compteurs sur le schéma.)

4° Si le secteur veut alimenter cette installation avec une ligne à 12 700 volts, quelle modification simple faut-il apporter au transformateur?

30. BNP. Creil. — On considère deux moteurs asynchrones de même puissance alimentés par des courants de même fréquence sous la même tension. L'un de ces moteurs est monophasé, l'autre triphasé. Le tableau suivant résume leurs caractéristiques :

	Moteur monophasé	Moteur triphasé.
Puissance mécanique en *ch*.	75	75
Tension d'alimentation en volts	200	200
Fréquence en p/s	50	50
Nombre de pôles.	8	8
Rendement à pleine charge	0,856	0,905
Glissement	0,0175	0,028
Facteur de puissance.	0,84	0,90

Calculer pour chacun de ces moteurs :
a) la vitesse de rotation du rotor;
b) l'intensité du courant d'alimentation.

Chacun de ces moteurs est alimenté par un branchement de 50 mètres. Pour établir ces canalisations, on a admis la même densité de courant dans les deux cas, soit 1,75 A par mm. Calculer le diamètre et le poids total des conducteurs de chaque branchement. Quel est le branchement le plus économique?

Densité du cuivre : 8,9 g/cm³.

31. ***BNP. Thiers.*** — On veut transporter une puissance de 1 200 kW à 25 *km* de la station génératrice en admettant une perte en ligne égale à 15 % de la puissance transportée.

Calculer la section et le poids des conducteurs en cuivre dans les cas suivants :

1° la distribution se fait en courant continu sous 3 000 volts;

2° la distribution se fait en courant alternatif monophasé sous 30 000 volts. L'installation comprend deux transformateurs, l'un élévateur de tension au départ, l'autre abaisseur de tension à l'arrivée. Ces deux transformateurs ont le même rendement, soit 96,5 % et le facteur de puissance de la ligne est 0,7;

3° on utilise des courants triphasés, une distribution à trois fils sous une tension de 30 000 volts. Le réseau comprend deux transformateurs triphasés, l'un élévateur, l'autre abaisseur de tension, ayant chacun un rendement égal à 96,5 %. Le facteur de puissance du circuit de transport est 0,7.

On donne : résistivité du cuivre : 1,8 microhms, cm,
densité du cuivre : 8,9 g/cm³.

32. ***BNP. Limoges.*** — 1° Trouver la section du fil de ligne et le poids de cuivre nécessaire à un transport d'énergie dans les conditions suivantes :

longueur de la ligne : 30 kilomètres;
puissance transportée au départ : 200 kilowatts;
tension au départ : 10 000 volts en courant monophasé;
pertes consenties en ligne : 10 % de la puissance initiale.
(Densité du cuivre 8,9, résistivité $1{,}6 . 10^{-6}$ ohms.cm.).

2° Traiter le même problème en supposant que le transport se fait en courant triphasé par une ligne à trois fils :
a) sans déphasage;
b) avec un facteur de puissance $\cos \varphi = 0{,}75$.

33. ***B. N. P. Tarbes 1955.*** (3 h). — Un réseau triphasé 220 V, 50 Hz alimente une installation comprenant :

1° 3 appareils A montés en étoile, ayant chacun une résistance de 2 Ω et une inductance de 0,0146 H;

2° Un moteur asynchrone triphasé B de 20 ch, rendement à pleine charge 0,9, facteur de puissance 0,85;

3° Un groupe D de petits moteurs asynchrones triphasés consommant ensemble par fil de ligne un courant watté de 40 A et un courant déwatté de 20 A.

Calculer :

1° la puissance active et la puissance réactive absorbées par l'ensemble des récepteurs;

2° l'intensité du courant total et le facteur de puissance de l'installation;

3° le prix de l'énergie nécessaire pour 8 h de fonctionnement, le kWh coûtant 8 fr et le kvarh 2 fr;

4° la vitesse et le moment du couple moteur du moteur B le stator ayant 6 pôles et le glissement étant 4 %;

5° la capacité de chacun des 3 condensateurs à monter en triangle, en dérivation avec l'installation pour ramener le facteur de puissance à 0,9. Quelle est ainsi l'économie journalière réalisée sur le prix de l'énergie consommée.

34. E. N. P. Tarbes 1951. — Un transformateur triphasé triangle-étoile comporte 4 000 spires par bobine primaire et 50 spires par bobine secondaire. Il est alimenté par une ligne triphasée 10 000 V, 50 Hz, le courant dans chaque fil étant 2 A. Dans le transformateur la chute de tension est 2 % et le rendement est 96 % à pleine charge. Le secondaire alimente des lampes situées à 2 km par l'intermédiaire d'une ligne dont la résistance par fil est de 0,05 Ω/km et la réactance de self par fil 0,2 Ω/km. Les lampes, de puissance 100 W (dans les conditions du problème) sont montées en 3 groupes égaux, entre phase et neutre.

1° Calculer, dans la ligne :

a) la tension entre fils de ligne au départ;

b) l'intensité du courant par fil de ligne (on suppose que les facteurs de puissance du primaire et du secondaire du transformateur sont égaux);

c) la chute de tension par phase et entre fils.

d) la tension par phase et entre fils à l'arrivée;

2° quel est le nombre total des lampes?

3° quel est le facteur de puissance au départ de la ligne?

4° quel est le rendement global de l'installation?

35. E. N. P. Tarbes 1956. (*Réparation* 2 *h*). — A. Sur un réseau triphasé 125-220 V, 50 Hz on monte :

1° un moteur asynchrone triphasé 10 ch, 4 pôles, stator bobiné en triangle; rendement à pleine charge 0,85; glissement : 0,04; facteur de puissance : 0,8;

2° un moteur asynchrone monophasé, 2 ch, 6 pôles, 220 V; rendement 0,75; glissement 0,06, facteur de puissance : 0,8;

a) Faire un schéma indiquant le montage des 2 moteurs;

b) quelle est la vitesse de rotation de chaque moteur, en marche normale?

c) quelle est l'intensité du courant absorbé par chaque moteur? En déduire l'intensité du courant dans chaque fil de ligne;

B. La tension du réseau est modifiée et portée à 220-380 V. Comment faut-il alors monter les deux moteurs? Quels changements sont apportés dans les intensités de courant?

36. E. N. P. Tarbes 1952. — Un moteur asynchrone triphasé de 20 ch, 220 V, 50 Hz, monté en triangle, tourne à pleine charge à 1 440 tr/mn. Au bout de 5 h de fonctionnement, un compteur d'énergie active a enregistré 82,5 kWh et un compteur d'énergie réactive 47,6 kvarh.

Calculer :

1° le glissement et le moment du couple moteur;

2° le rendement industriel du moteur;

3° le facteur de puissance et l'intensité du courant dans chaque fil de ligne;

4° les indications de chacun des deux wattmètres (montés suivant la méthode des 2 wattmètres) et destinés à mesurer la puissance active absorbée par le moteur;

5° la capacité de 3 condensateurs à monter en dérivation avec le moteur pour que le facteur de puissance devienne égal à 1.

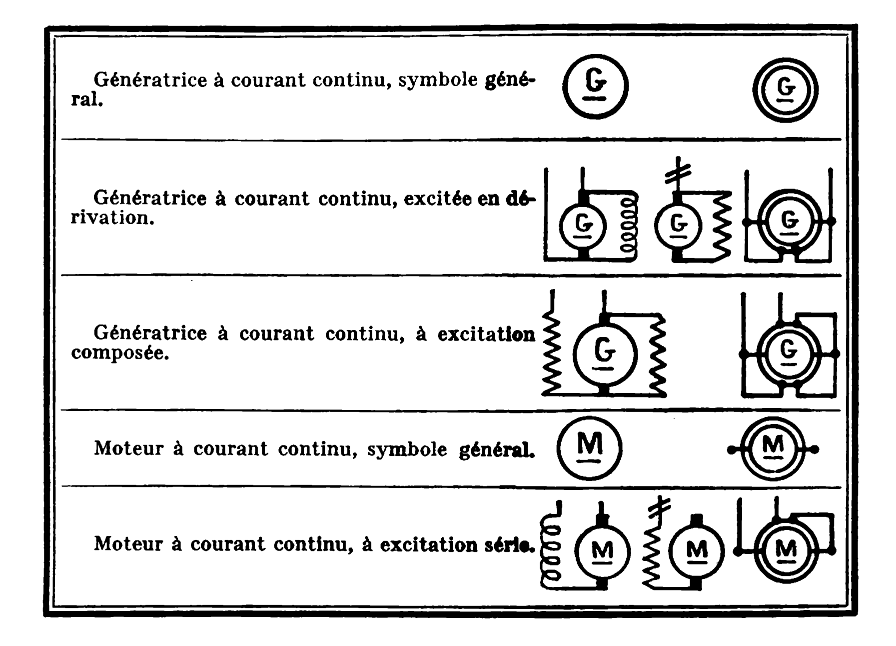
a) les condensateurs sont montés en étoile.

b) les condensateurs sont montés en triangle.

Symboles graphiques

Ces symboles représentent les divers appareils ou machines dans les dessins de projets d'installations électriques. La liste en a été dressée par la Commission électrotechnique internationale et homologuée par le Comité supérieur de normalisation en 1930. *Pour figurer un appareil déterminé, plusieurs symboles différents ont parfois été prévus. Les plus simples, qui sont les plus difficiles à interpréter, s'emploient dans les schémas d'ensemble afin de ne pas surcharger le dessin.*

Les symboles graphiques forment une sorte de langage technique universel que tout électricien doit comprendre et savoir employer. On en trouvera la liste complète dans la brochure C2 *publiée par l'Union des Syndicats de l'Électricité.*



On remarquera que les symboles pour les génératrices et les moteurs ne diffèrent que par les lettres G et M.

Dans les installations où le repérage des conducteurs est utile, on utilise les couleurs suivantes :

Distribution à deux fils.
- *Positif* + *Teinte rouge.*
- *Négatif* — *Teinte bleu foncé.*

Distribution à trois fils.
- *Positif* + *Teinte rouge.*
- *Neutre* (∓) *Teinte blanche.*
- *Négatif* — *Teinte bleu foncé.*

Transformateur ordinaire monophasé.

Transformateur ordinaire triphasé, étoile-triangle.

Transformateur d'intensité.

Autotransformateur monophasé.

Transformateur triphasé 50 p/s, étoile avec neutre sorti-triangle 58 000/5.800 V. 4 000 kVA.

Génératrice à courant alternatif triphasé.

Génératrice à courant alternatif triphasé, étoile avec neutre sorti.

Génératrice à courant alternatif triphasé, 50 p/s, 6 000 V, 4 000 kVA, excitation à 220 V, triangle.

Moteur à courant alternatif synchrone triphasé.

Moteur asynchrone triphasé, rotor en court-circuit.
Moteur asynchrone triphasé avec induit à bagues.
Moteur alternatif à collecteur, symbole général.
Commutatrice triphasé continu
Moteur-générateur : moteur asynchrone triphasé, génératrice à courant continu excitée en dérivation.
Redresseur à mercure, à 3 anodes.
Compteur, symbole général.
Disjoncteur dans l'huile, à 3 pôles accouplés, 2 sont commandés mécaniquement.

REMARQUE. — *Quand on exécute des installations électriques compliquées, il est parfois nécessaire de repérer les conducteurs. Pour les distributions triphasées, le Comité de Normalisation a fixé les teintes suivantes : neutre : gris; phase I : vert; phase II : jaune; phase III : brun.*

La phase II est celle dont la tension est en retard *de* $2\pi : 3$ *sur celle de la phase choisie comme phase I; le déphasage* en retard *de la phase III sur la phase I est* $4\pi : 3$. — *Dans les dessins, le neutre est repéré par le chiffre* 0, *les phases, respectivement par les chiffres* 1, 2 *et* 3.

Lorsqu'on a recours au montage dit des « deux wattmètres » pour la mesure d'une puissance ou d'une énergie, il est recommandé d'utiliser les phases verte *et* brune *pour alimenter les circuits* série *et de réserver la phase* jaune *pour le point commun des circuits* dérivés.

Table des matières.

I. CIRCUIT MAGNÉTIQUE ET ÉLECTRO-AIMANT

2. DYNAMOS A COURANT CONTINU

3. MOTEURS A COURANT CONTINU

4. TRANSFORMATEURS ET ALTERNATEURS

5. MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

6. DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

7. PROBLÈMES

LIBRAIRIE DELAGRAVE
Paris — N° 3185.
Dépôt légal : 3e trim. 1965.

Imprimé en France

BRODARD-TAUPIN
Imprimeur-Relieur
Coulommiers-Paris
63999-9-1965.

TECHNOLOGIE DES FABRICATIONS MÉCANIQUES

Collection publiée sous la Direction de **A. CHEVALIER**
Professeur technique de mécanique à l'E. N. N. A. de Paris

20 Fascicules (22,5 x 28), de 64 à 80 pages
Planches en regard du texte

---

1. **Le Livret de l'apprenti débutant**
   Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.
2. **Traçage et travaux de l'ajusteur mécanicien**
   Par E. LECŒUR.
3. **Tournage des métaux**
   Par A. CHEVALIER et R. JOLYS.
4. **Fraisage des métaux**
   Par A. DOURNIER et R. SAGET.
5. **Rabotage et brochage**
   Par M. VIGNAUD et R. DIETRICH.
6. **Perçage, alésage, filetage**
   Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.
7. **Usinage par abrasion**
   Par A. CHEVALIER et R. LABILLE.
8. **Assemblage et montage**
   Par E. LECŒUR.
9. **Matériaux. Traitements**
   Par J. LIGNON et M. MIJON.
10. **Usinage sans copeaux**
    Par J. HIBOUT et M. ROGER.
11. **Étude de la coupe des métaux**
    Par A. CHEVALIER.
12. **Étude fonctionnelle des machines-outils**
    Par A. JOLYS, R. PASQUET et R. VACQUER.
13. **Métrologie dimensionnelle**
    Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.
14. **Automatisation des machines-outils**
    Par M. BERNARD.
15. **Organisation des ateliers**
    Par A. HEURLEY et J. ROLLET.
16. **Analyse des travaux**
    Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.
17. **Étude des temps d'exécution**
    Par A. CHEVALIER et le B. T. E.
18. **Bureau d'Études**
    Par M. DELANETTE.
19. **Montages d'usinage**
    Par A. CHEVALIER et R. VACQUER.
20. **Méthode de dessin industriel**
    Par A. CHEVALIER et H. RIBEROL.

Imprimé en France • DELAGRAVE-PARIS (10-67)